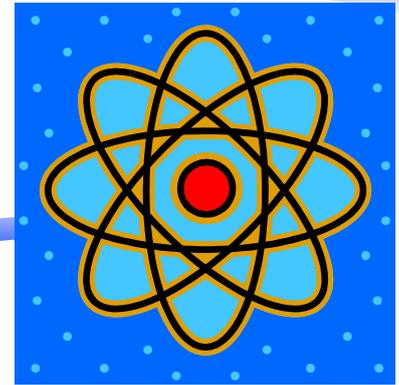


原子力安全解析セミナー

2014年11月27日(木) 開催



プログラム

14:00~14:10 (10分)	アドバンスソフト株式会社のご紹介 主催者あいさつ	専務取締役 三橋 利玄
14:10~14:30 (20分)	原子力安全解析サービスの紹介	主任研究員 森田 秀利
14:30~14:50 (20分)	原子力安全解析コードの使用例	主管技師長 浜野 明千宏
14:50~15:10 (20分)	シビアアクシデント評価の基礎技術	主管技師長 湊 明彦
15:10~15:30 (20分)	休憩	
15:30~15:50 (20分)	気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP による 沸騰現象などの3次元気液二相流解析	主管研究員 杉中 隆史
15:50~16:10 (20分)	流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red による 3次元流体解析	主任研究員 大西 陽一
16:10~16:30 (20分)	高速流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS による 爆発現象の影響評価予測のための流体-構造連成シミュレーション	研究主席 中森 一郎
16:30~16:45 (15分)	各種ソフトウェア及び関連サービスについて	営業部 小澤 淑子

memo

アドバンスソフト株式会社のご紹介

原子力安全解析セミナー
2014年11月27日（木）
アドバンスソフト株式会社

会社概要

名称 アドバンスソフト株式会社
(英文社名 AdvanceSoft Corporation)

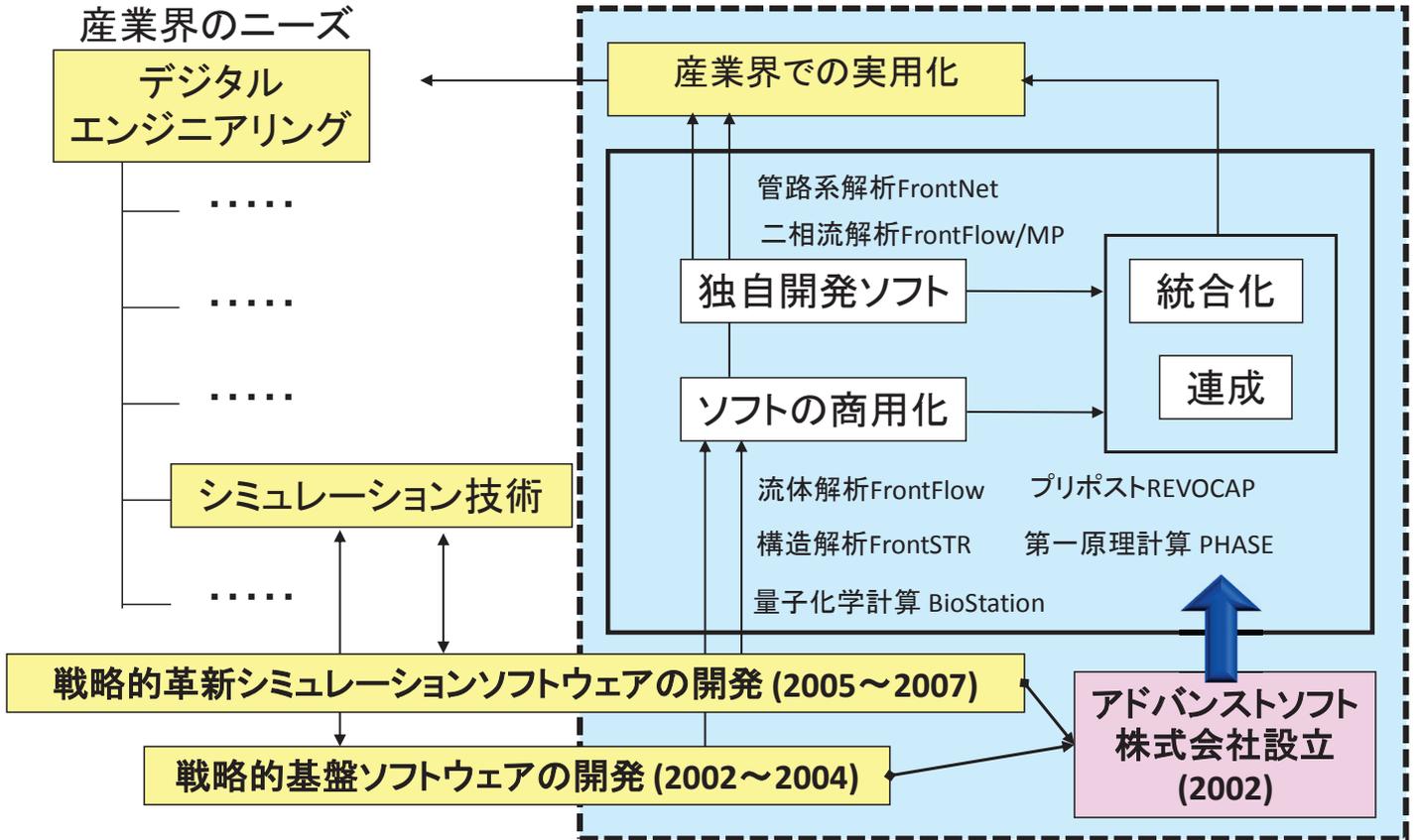
本社 〒101-0062
東京都千代田区神田駿河台4-3
新お茶の水ビル17階
TEL: 03-6826-3970
FAX: 03-5283-6580

設立 2002年(平成14年)4月24日

資本金 3,724万円

社員数 77名(2014年12月1日現在)

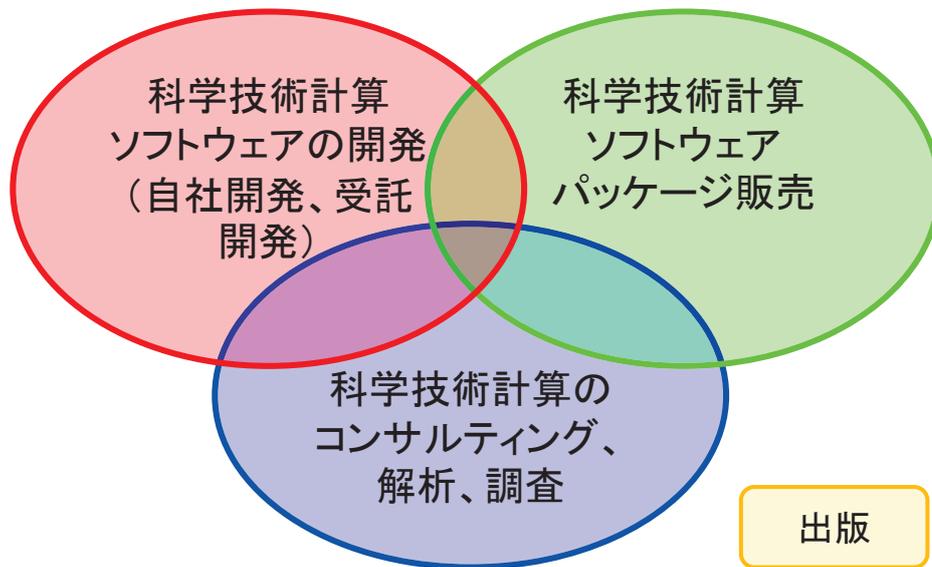
事業部	部	業務概要
第一事業部	事業部付	防災シミュレーション・連成システム開発など
	技術第1部	ナノ材料の第一原理計算、量子化学計算やメソ領域、半導体・T-CAD等に係る解析・開発など
	技術第2部	<ul style="list-style-type: none"> ・プリポスト、可視化システム、連成システム開発など ・J-PARCIに係わるプロジェクトの実施など ・構造解析エンジニアリングなど ・次世代TCADシステムの開発など
第二事業部	事業部付	二相流解析および原子力安全解析など
	技術第3部	・乱流、燃焼、化学反応等に係わる次世代流体システム開発など
	技術第4部	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス、液体パイプライン、農業用パイプライン、液体ロケットエンジン等の管路系流体解析・開発 ・火災・爆発に係わる防災リスク解析・開発など ・次世代混相流システム開発など
	技術第5部	原子力・エネルギー利用に係る安全性解析など
—	総合企画部	<ul style="list-style-type: none"> ・コンサルティングサービスの提供など ・解析サービスの提供など
営業本部	営業部	お客様窓口
東海事業所		お客様窓口



アドバンスソフトの事業分野と事業内容

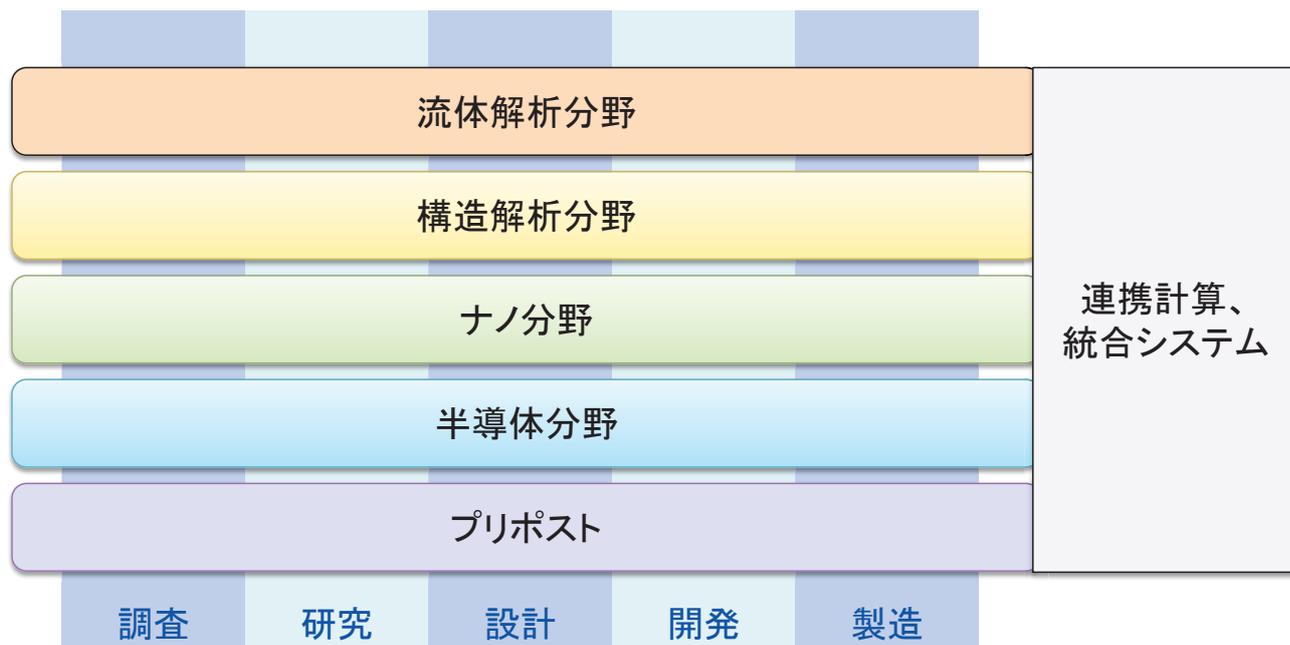


アドバンスソフトがご提供するサービス



科学技術計算ソフトウェアの開発を基礎とした、
科学技術計算に関する様々なソリューションをご提供します。

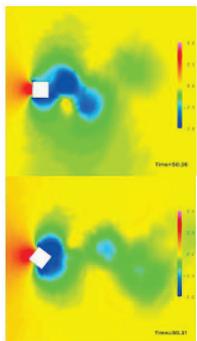
事業分野



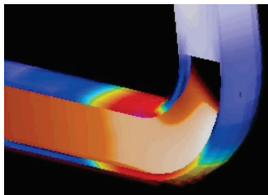
産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、
科学技術計算によるソリューションをご提供します。

流体

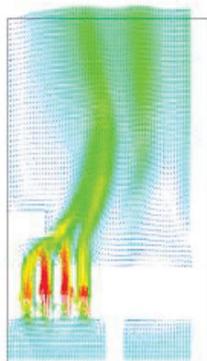
Advance/FrontFlow/red



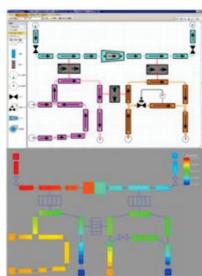
Advance/FrontFlow/FOCUS



Advance/FrontFlow/MP

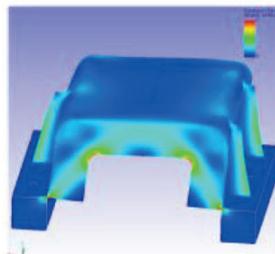


Advance/FrontNetシリーズ



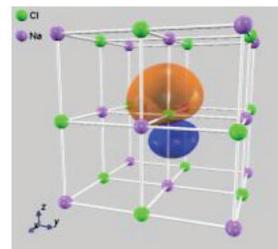
構造

Advance/FrontSTR



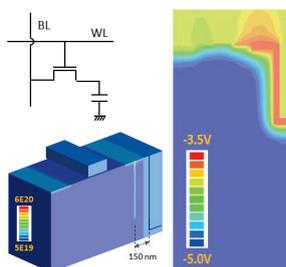
ナノ

Advance/PHASE



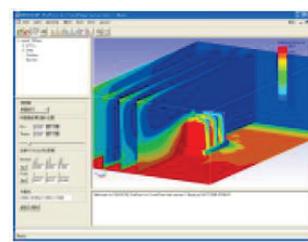
半導体

Advance/DESSERT



プリポスト

Advance/REVOCAP



※上記は主要パッケージを掲載しています。詳細は弊社HP (www.advancesoft.jp) をご参照ください。

ソフトウェア名称	解析内容
Advance/FrontFlow/red	流体解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/MP	気液二相流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/FOCUS	高速流解析・爆発解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/SSMP	超音速気液二相流解析ソフトウェア
Advance/EVE SAYFA	火災解析・環境安全解析シミュレータ
Advance/FrontNet	管路系1次元流体解析ソフトウェア群
Advance/FrontSTR	汎用構造解析ソフトウェア
Advance/FrontNoise	音響解析ソフトウェア
Advance/REVOCAP	構造解析・流体解析プリポストプロセッサ
Advance/PHASE	第一原理バンド計算ソフトウェア
Advance/DESSERT	半導体デバイスシミュレータ
Advance/OCTA	ソフトマテリアル統合シミュレータ

(注)表には主要なものを挙げている。詳細はwww.advancesoft.jpへ

■流体解析を主とした原子力安全解析の取り組み

■業務内容

- ✓システム解析コード(システムコード)を用いた解析
- ✓システム解析コードの改良・整備
- ✓個別事象解析コード(自社開発の流体解析コードが主)を用いた解析
- ✓個別事象解析コードの開発・整備
- ✓文献調査、技術調査
- ✓コンサルティングその他

■業務対象

- ✓設計基準事故解析からシビアアクシデント解析まで幅広い
- ✓軽水炉(BWR、PWR)、高温ガス炉(HTGR)、高速炉、核融合実験炉(ITER)、加速器駆動システム(ADS)、再処理施設、廃棄物処理施設、その他

■本日の前半でシステム解析コードに対する取り組み、後半で個別事象解析コードに対する取り組みをご紹介します

主要な原子力安全解析コード

青字:システム解析コード
(前半で取り組みをご紹介します)

赤字:個別事象解析コード
(後半で機能や事例をご紹介します)

環境影響評価
SPEEDI

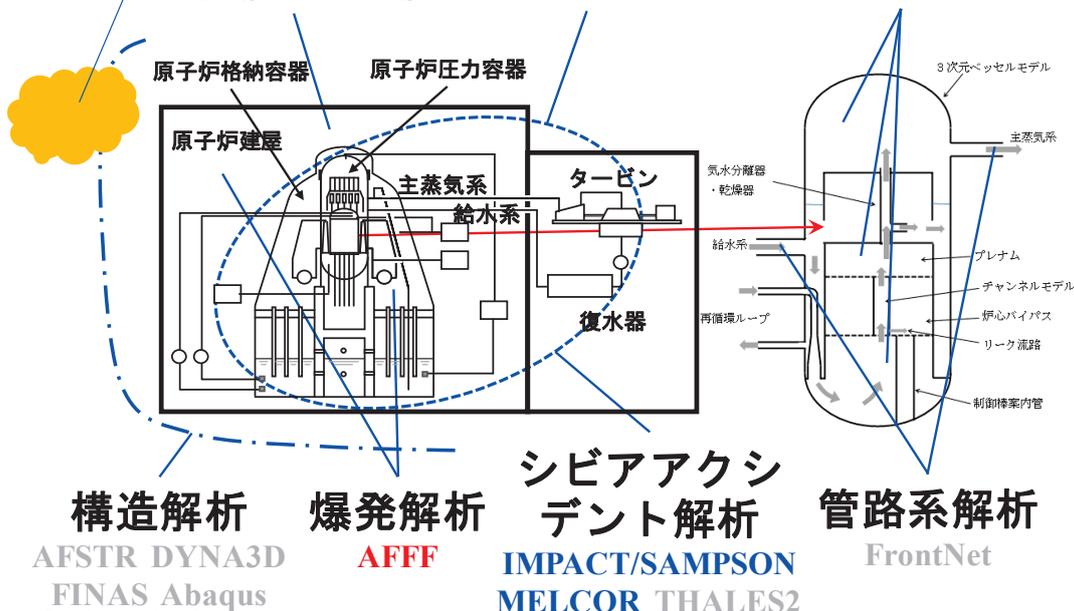
熱水力解析
(システム解析)

※アドバンスシミュレーションVol.19より

熱水力解析
(3次元解析)
AFFr AFFMP

火災解析
EVE SAYFA FDS

RELAP5 GOTHIC
TRAC-M TRACE



構造解析
AFSTR DYNA3D
FINAS Abaqus

爆発解析
AFFE

シビアアクシ
デント解析
IMPACT/SAMPSON
MELCOR THALES2

管路系解析
FrontNet

システム解析コード

解析コード	概要
熱水力解析ソフトウェア RELAP5	RELAPシリーズは米国アイダホ国立研究所で開発が続けられてきた原子炉での事故解析の解析コードであり、RELAP5では、二流体モデルが採用され、原子炉内の現象や機器のための解析モデルを実装
格納容器熱水力解析ソフトウェア GOTHIC	米国で開発された原子炉格納容器専用の熱水力解析コードであり、多成分気体から成る気相、液滴の分散液相、液膜やプール水の連続液相の多相流モデルを採用し、格納容器内の現象や機器の解析モデルを実装
シビアアクシデント総合解析ソフトウェア IMPACT/SAMPSON	IMPACTは、エネルギー総合工学研究所殿の軽水炉プラントシビアアクシデント解析ソフトウェアシステムであり、SAMPSONは、運転からシビアアクシデント時の原子炉容器内事象、格納容器内事象に至る現象を一貫解析し、格納容器の健全性、核分裂生成物の放出挙動が評価
シビアアクシデント総合解析ソフトウェア MELCOR	米国で開発されたシビアアクシデント総合解析コードであり、原子炉圧力容器内事象から原子炉格納容器内事象に至る現象を一貫して解析可能
衝撃解析ソフトウェア DYNA3D	米国で開発された衝撃時の構造物の大変形や破壊の挙動の解析コードであり、Advance/FrontFlow/FOCUSと組み合わせて、爆発解析が可能

個別事象解析コード

解析コード	概要
建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA	原子炉建屋の火災解析の実績を持ち、屋内火災や生物化学兵器テロの発生を想定した有害危険物質の拡散予測、機械排煙などの防災設備による減災効果の検証や避難計画の立案などに活用
爆発解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/FOCUS	高速流を効率的に解析するための構造格子系（一般曲線座標系）の流体解析ソフトウェアで、DYNA3Dと組み合わせて構造物の大変形を伴う爆発解析に適用
管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet	配管内を流れる流体(液体、単相流、気液混合流)の特性を活かし使い分けの管路系流体解析ソフトウェア群
気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP	Advance/FrontFlow/redの枠組みを活用した複雑な形状での混相流問題に特化した気液二相流解析ソフトウェア、沸騰・凝縮を伴う気液二相流解析や気泡群詳細解析などの高精度な気液二相流解析が可能
流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red	LESによる優れた乱流解析機能やさまざまな現象を忠実に再現する高度な解析機能を有した流体解析ソフトウェア
構造解析ソフトウェア Advance/FrontSTR	弾塑性静解析、固有値解析、熱解析および動解析に関する3次元解析のための、先進性と実用性を兼ね備えた汎用構造解析ソフトウェア

facebook、YouTubeでも関連記事を掲載中

<http://www.facebook.com/advancesoft.jp>



<http://www.youtube.com/user/advancesoft>





AdvanceSoft

「デジタルエンジニアリングのアドバンスソフト」

原子力安全解析サービスの紹介

第2事業部 森田 秀利

原子力安全解析セミナー
2014年11月27日（木）
アドバンスソフト株式会社

原子力安全解析業務

□ 業務内容

- システムコードを用いた受託解析
- システムコードの改良、開発
- 原子力分野の文献調査
- コンサルティング業務
- 人材の出向、派遣業務(予定)

システムコードについて

原子力発電プラントの安全性の評価を行うための解析コード

- 熱水力解析（システム解析）
- 熱水力解析（3次元解析）
- シビアアクシデント解析
- 管路系解析
- 爆発解析
- 構造解析
- 火災解析
- 環境影響評価
- 燃料挙動解析

環境影響評価 SPEEDI

火災解析

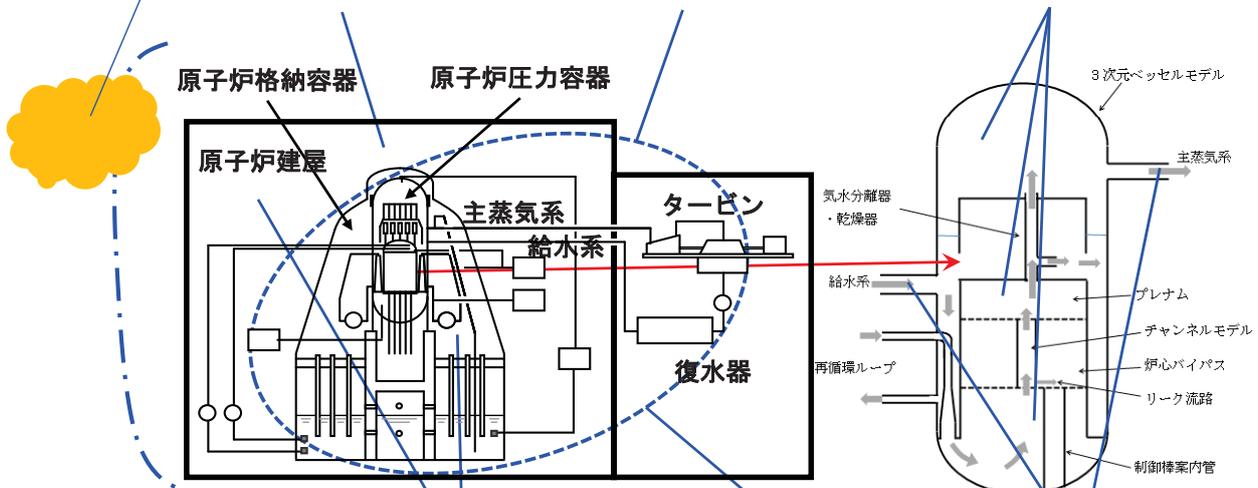
EVE SAYFA FDS

熱水力解析 (システム解析)

RELAP5 GOTHIC
TRAC-M TRACE

熱水力解析 (3次元解析)

AFFr AFFMP



構造解析

AFSTR DYNA3D

爆発解析

AFFF

シビアアクシ デント解析

IMPACT/SAMPSON
MELCOR THALES2

管路系解析

FrontNet

FINAS Abaqus

当社で実績のあるシステムコード

- 熱水力解析コード
 - RELAP5
 - TRACE
 - CONTEMPT
 - GOTHIC
- シビアアクシデント解析コード
 - SAMPSON
 - MELCOR
 - THALES2

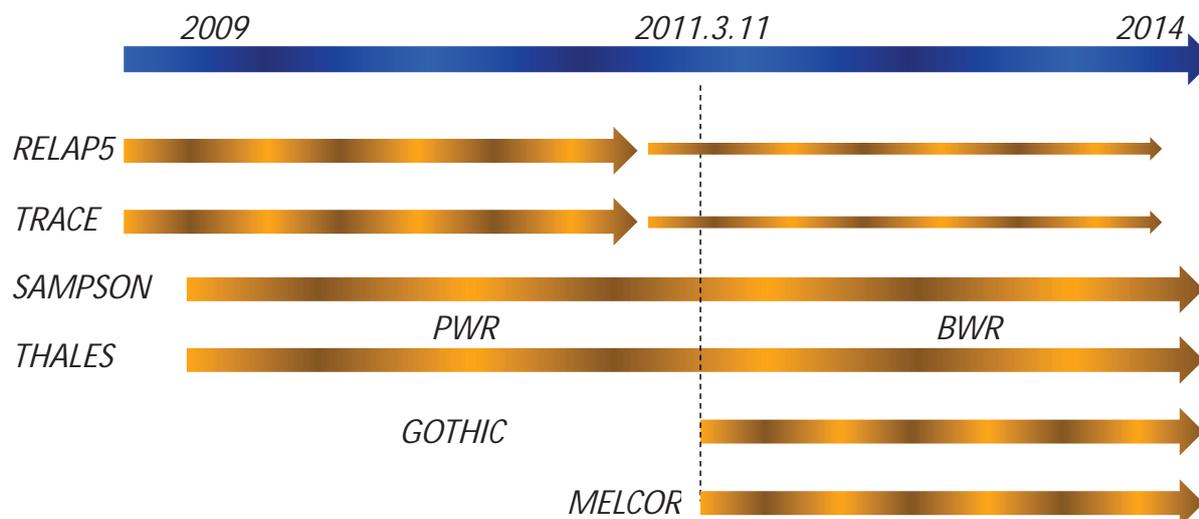
システムコードの種類

- *RELAP5*(Reactor Excursion and Leak Analysis Program)
 - 米国のINL(Idaho National Laboratory)で開発が続けられてきた原子炉過渡事象解析コード
 - 1次元熱流動計算
- *TRACE*(TRAC/RELAP Advanced Computational Engine)
 - 米国のロスアラモス国立研究所で開発されたTRACコードと、アイダホ国立研究所で開発されたRELAPコードを主体としてUSNRC(U. S. Nuclear Regulatory Commission)の支援により合体させた最新の原子炉過渡事象解析コード
 - 1次元、3次元(圧力容器)熱流動計算

- *MELCOR*(Methods for Estimation of Leakages and Consequences of Releases)
 - 米国のINL(Idaho National Laboratory)で開発が続けられてきた原子炉過渡事象解析コード
 - 1次元熱流動計算
- *GOTHIC*(Generation of Thermal-Hydraulic Information for Containments)
 - 米国 NAI(Numerical Applications Inc.)社により開発された汎用熱流体解析コード
 - 気相,液滴,液滴以外の液相の3相を基本とし事故時の圧力・温度・気相成分濃度、水素燃焼等を計算

- *SAMPSON*(Severe Accident Analysis Code with Mechanistic , Parallelized Simulations Oriented towards Nuclear Field)
 - エネルギー総合工学研究所 (IAE)が所有する、軽水炉プラントシビアアクシデント解析ソフトウェアシステムコード
 - 運転からシビアアクシデント時の原子炉容器内事象、格納容器内事象に至る現象を一貫解析し、格納容器の健全性、核分裂生成物の放出挙動が評価
- *THALES2*(Thermal-Hydraulic Analysis of Loss of Coolant, Emergency Core Cooling and Severe Core Damage)
 - 日本原子力研究開発機構 (JAEA)で開発されてきたプラントシビアアクシデント解析ソフトウェアシステムコード
 - 熱水力及び炉心溶融進展解析

当社の原子力安全解析の経緯



3.11事故前後で使用するシステムコードに変化が見られる

業務実績(3.11前)

コード	件名
RELAP	平成18年度 PWR3ループプラントのPTS評価用熱流動解析
RELAP	平成18年度「OECD/PKL試験及びOECD/ROSA試験の試験解析」
RELAP	OECD/ROSA試験の試験解析
RELAP	平成20年度 OECD/ROSA計画の試験解析
TRAC,SKETCH	平成21年度 三次元核熱動特性解析コードによるRIA解析機能の整備
TRACE	平成20年度 TRACEコードによるPWRプラントのLOCA解析手法の整備
TRACE	平成21年度PWRプラントのECCSサンプスクリーン下流側影響等に関する評価

業務実績(3.11後)

コード	件名
SAMPSON	SAMPSONコード倍精度化の導入
SAMPSON	冷却系統機器等モデルの追加改良
SAMPSON	SAMPSON入力データの更新と一貫解析
SAMPSON	ウェットウェル詳細解析モデルの追加改良
SAMPSON	圧力容器下部プレナムにおけるデブリ・構造材相互作用モデル追加改良
GOTHIC	平成24年度事故時格納容器内挙動解析コードGOTHICの整備
GOTHIC	平成25年度多重事故事象を含めた格納容器解析
MELCOR	平成25年度MELCORモデルのデータベース構築
MELCOR	福島第一原発事故解析用MELCOR入力データの1.8.5から1.8.6への変換
THALES2	解析モデル調査及びTHALES2のタイムステップ依存性の改善
THALES	THALES2コードのCsBO2,Cs2MoO4及びHI評価機能追加
RELAP	平成24年度OECD/PKL-3計画試験の解析評価
TRACE	平成24年度PWR過渡事象に対する統計的安全評価手法の整備

- ✓SAMPSON, MELCOR, THALESを中心としたシビアアクシデント解析コードを用いた仕事
- ✓現在もこれらを中心とした作業を継続中

その他活動

- ✓ 原子力シビアアクシデント評価委員会
- ✓ 原子力学会
- ✓ 混相流学会

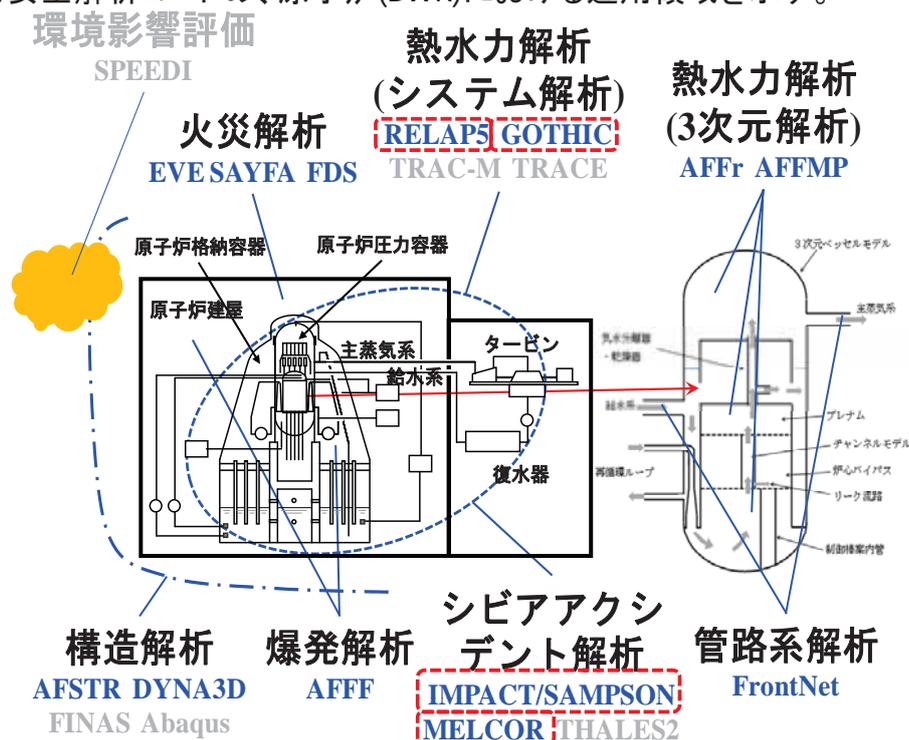
原子力安全解析コードの使用例

第2事業部 浜野 明千宏

原子力安全解析セミナー
2014年11月27日 (木)
アドバンスソフト株式会社

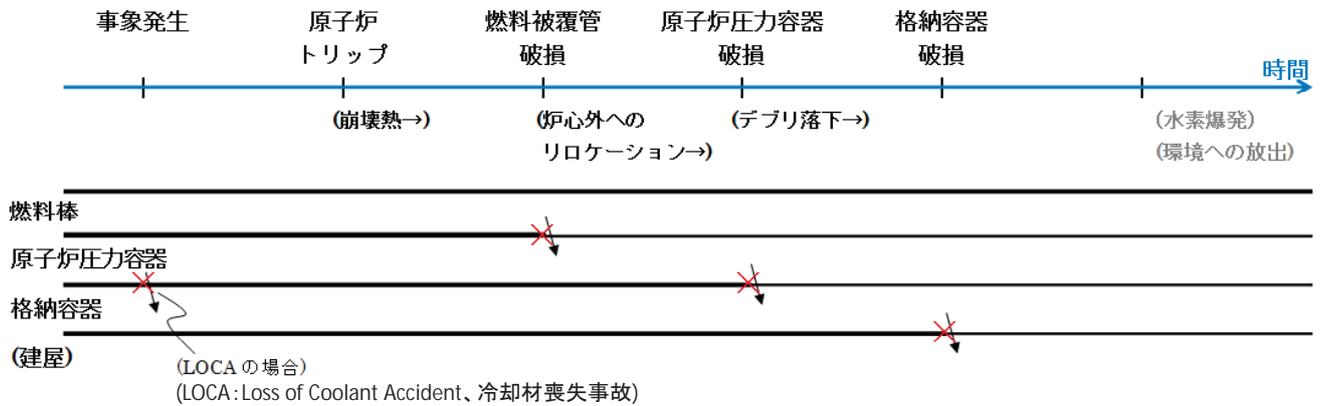
原子力安全解析コード

主要な原子力安全解析コードの、原子炉(BWR)における適用領域を示す。

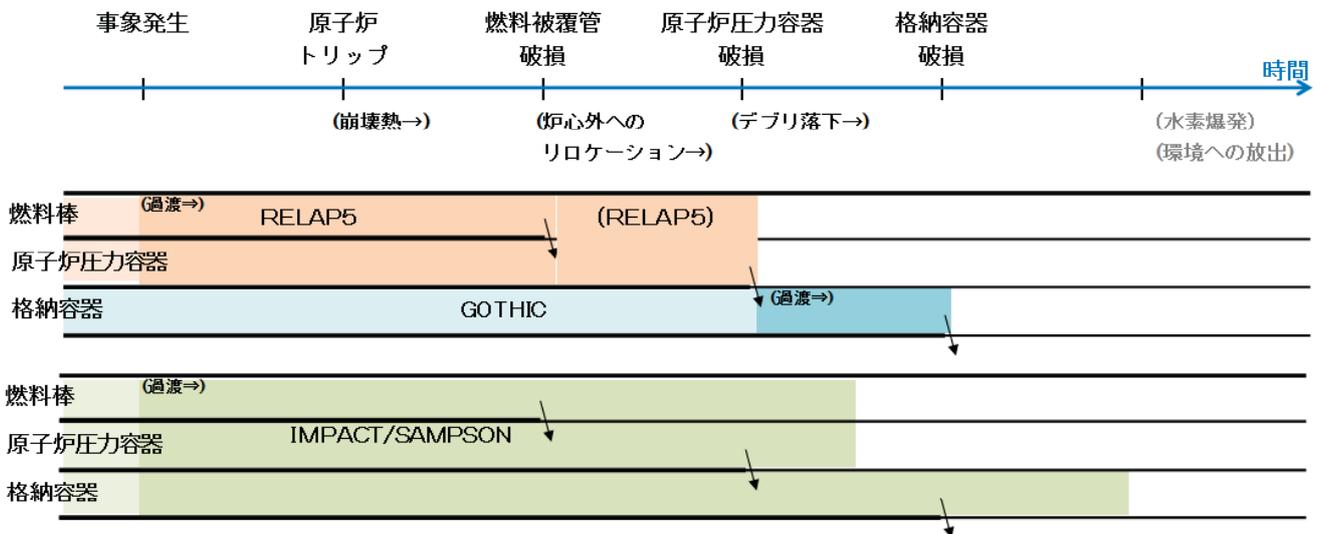


(青字:アドバンスシミュレーション誌19号で紹介、赤枠:本資料で紹介)

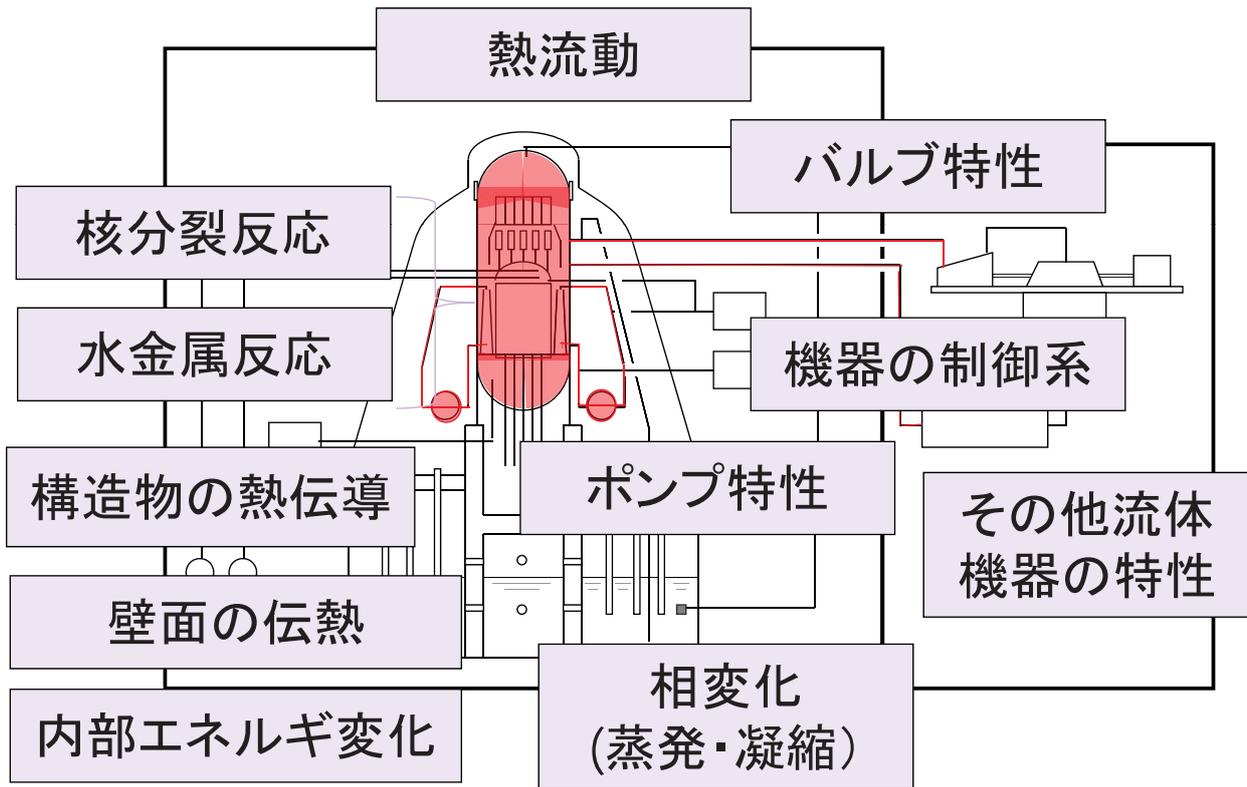
事象進展の例



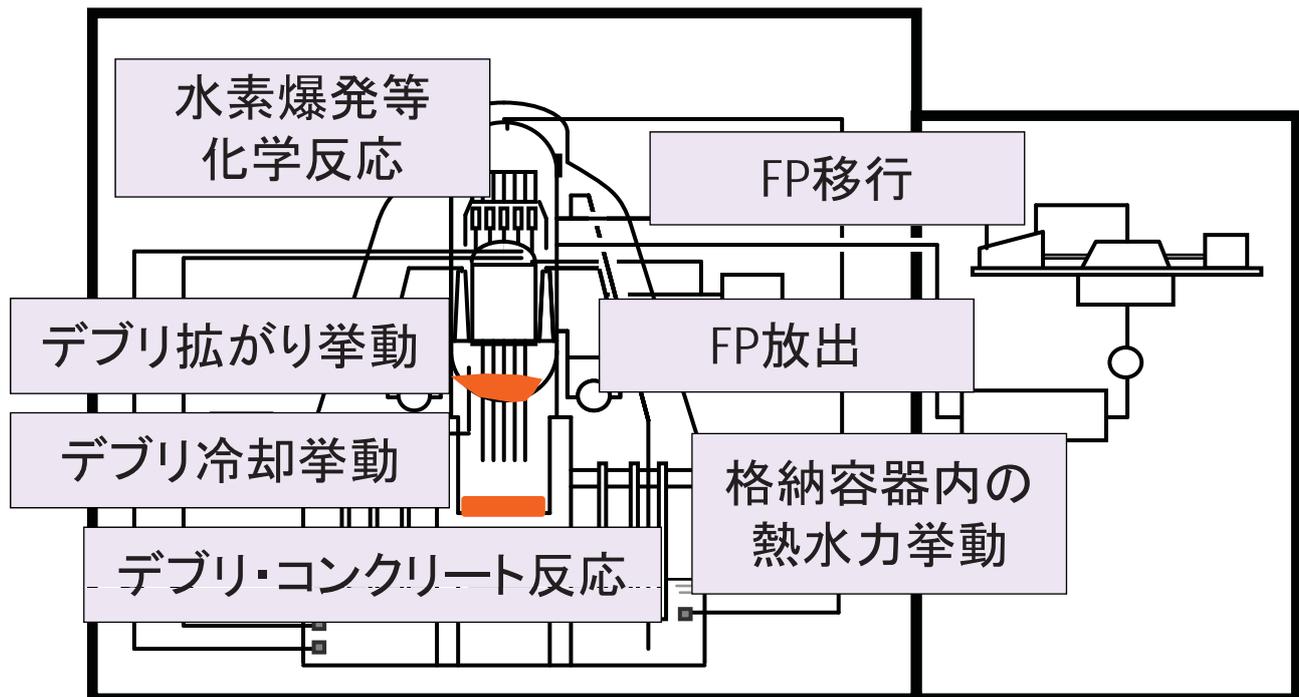
解析コードの対象範囲



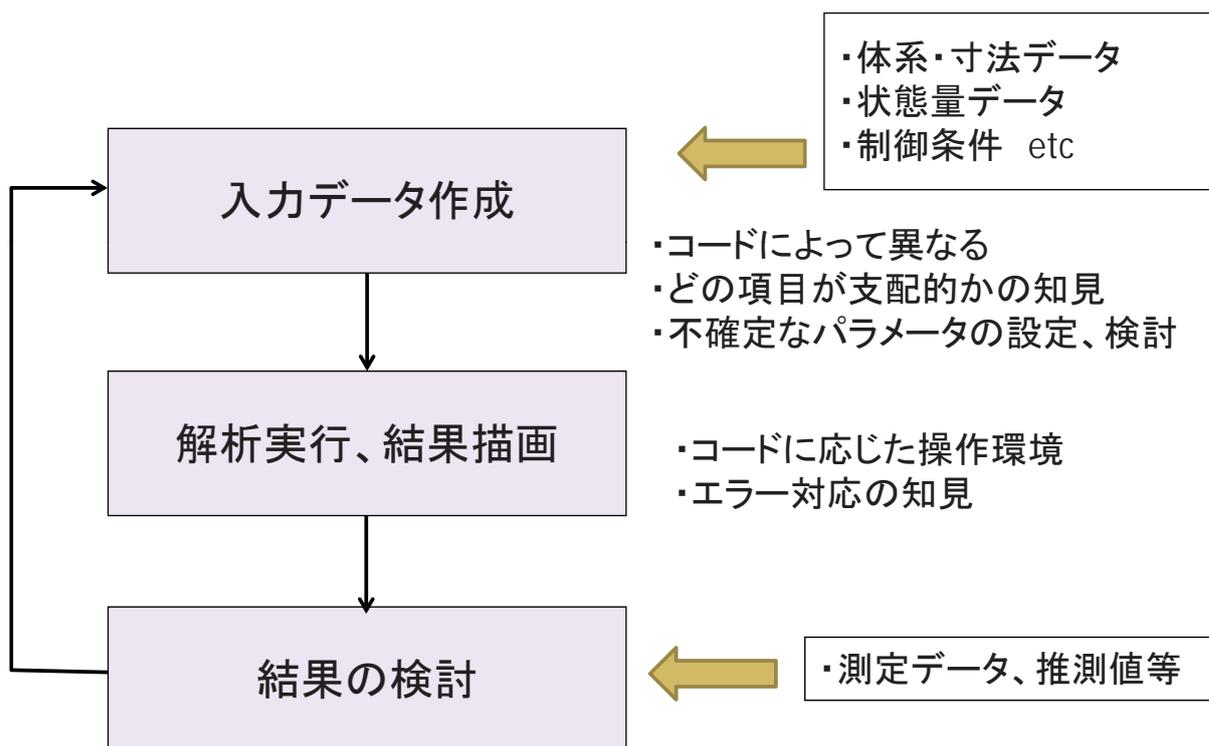
熱水力解析（システム解析）の主要要件



シビアアクシデント解析のその他の主要要件



解析の手順



入力データの概要

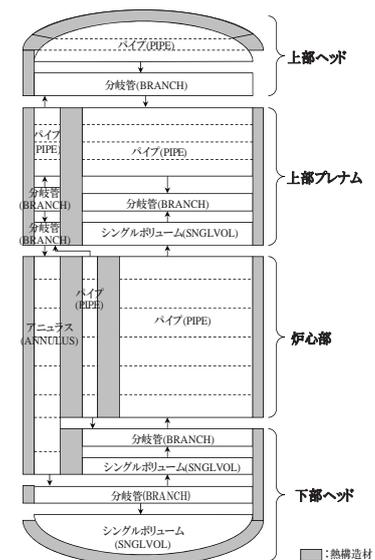
	RELAP5	MELCOR	IMPACT/SAMPSON	GOTHIC
形状モデル	水力コンポーネント・熱構造材の幾何データ	CVH、FL、HS、COR、CAV等	各部のモジュールごとの入力データ	Control Volume、Flow Path、Thermal Conductor
物性データ	物性データ	同上	同上	Material
初期条件	水力コンポーネント・熱構造材のデータ	同上	同上	Initial Condition
流体機器、制御系	機器コンポーネントデータ、制御系データ	当該パッケージデータ、CF(制御関数)データ	熱水力挙動解析モジュールの入力データ	Component、Control variable、Trip
境界条件	時間依存ボリューム・ジャンクション、原子炉動特性データ等	CVH、FL等データ	熱水力挙動解析モジュールの入力データ	Boundary Condition
事象の想定	トリップデータ、仮想バルブ等	CF(制御関数)データ	熱水力挙動解析モジュールの入力データ	(Function)
破損判定条件	-	CF(制御関数)データ	デブリ挙動に関する各モジュールの入力データ	-

入力データ作成時の留意点

- 形状モデル**
 現象に応じた、支配項目を考慮する(容積が重要なのか、高さが重要なのか等)
 各部それぞれ、メッシュ細分すべきかどうかの検討
- 初期条件**
 事象の想定(保守的/現実的)
- 流体機器、制御系**
 機器固有の特性データ、プラント固有データ(運転条件との整合性で調整)
- 境界条件**
 事象の想定(保守的/現実的)
 時系列で設定する場合の扱い
- 破損判定条件**(コードに組み込まれている場合もある)
 模擬実験や過去の事例の知見の解釈

RELAP5

- BWR 及び PWR プラントの過渡・事故解析
- 開発元: INEL (アイダホ国立工学研究所)
- 流動計算**
 熱水力モデル: 1次元非均質熱的非平衡モデル
 (気相と液相の質量、運動量、エネルギーの計6保存式)
 数値解法: 空間は有限差分法、スタaggered格子、ドナーセル法、時間は線形半陰解法(or近似的陰解法)
- 熱伝達計算** 強制対流、プール沸騰、自然循環の相関式
- 熱計算**
 構造物熱伝導: 1次元熱伝導方程式(オプションで2次元)
 原子炉動特性: 1点近似動特性モデル・6群遅発中性子モデル、崩壊熱モデル
- 流体機器**: 気水分離器、ポンプ、ジェット・ポンプ、バルブ、タービン、蓄圧器
- 原子炉制御系**: 例えば、原子炉圧力制御系、原子炉水位制御系、原子炉出力制御系、再循環流量制御系を模擬

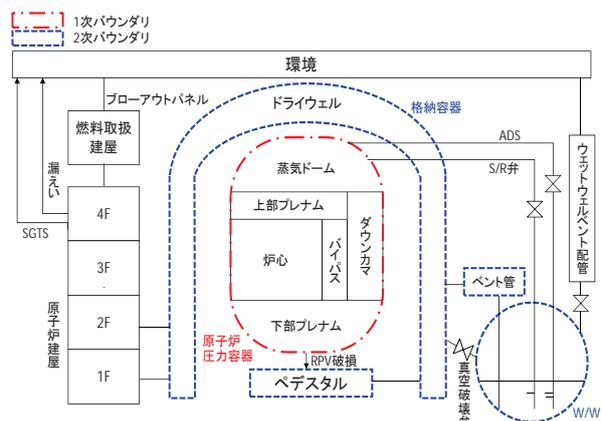


RELAP5の主な入力データ

- 個々の水力コンポーネント**
 ボリューム幾何データ(流路面積、長さ、体積、水平角、傾角、高低差、粗度、等価直径、壁面摩擦・熱的平衡等の計算モデルの指定)
 ボリューム初期条件(温度、圧力、クオリティー、液相・気相内部比エネルギー、ボイド率、非凝縮クオリティー)
 ジャンクション幾何データ(流路面積、正流・逆流エネルギー損失係数、水平/垂直、臨界流計算指定、面積平滑変化指定、流路急変指定、クロス・フロー指定)
 ジャンクション初期条件(液相/気相速度等)
- 熱構造材**: 形状内の構造材数、厚さ方向格子点数、形状(直方体/円柱/球)、初期計算の有無、左右境界座標、再冠水モデル指定、軸方向最大分割数
- 境界条件データ**(時間依存ボリューム、ジャンクション時間依存)
 変数種別、トリップ番号、変数名・番号、変化量テーブルの組
- 流体機器**: 機器固有の特性データ
- 制御系、トリップ**
- 原子炉動特性**

MELCOR

- MELCOR (Methods for Estimation of Leakages and Consequences of Releases)
- 軽水炉におけるシビアアクシデント時の事故の進展を解
- 米国NRC(原子力規制委員会)がサンディア国立研究所(SNL)に委託して開発



出典: <http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/700/12/001/1-6-1.pdf>

MELCORのモジュール(「パッケージ」)

- BH(Bottom Head)下部プレナムの熱応答、下部ヘッドのヒートアップ、原子炉容器からドライウェルへの炉心構造材の流出
- BUR(Burn) : 水素・一酸化炭素の燃焼・爆燃
- CAV(Cavity) : ベースマットコンクリートへの高温(溶融)炉心の接触(溶融炉心／コンクリート相互作用;MCCI)(伝熱、コンクリートのアブレーション(融蝕)、キャビティの変形、ガス発生)
- CND(Condenser) : 熱交換(アイソレーションコンデンサー系(ICS)・受動的格納容器冷却系(PCCS))
- COR(Core) : 炉心・炉内構造物(炉心直下の下部ヘッド部分を含む)の熱応答(溶融、落下、デブリリロケーションによる炉心・下部プレナム構造物のリロケーション)
- CVH、FL(Control Volume Hydrodynamics、Flow Path) : コントロールボリュームの熱水力・熱流動等

MELCORのモジュール(「パッケージ」)

- DCH(Decay Heat) : 崩壊熱
- FCL(Fan Cooler) : ファンクーラー内質量・熱移行
- FDI(Fuel Dispersal Interactions) : 下部ヘッド破損時の低圧・高圧融体放出
- HS(Heat Structure) : 熱構造体の熱伝導
- MP(Material Properties) : 物性
- NCG/H2O(Non-Condensable Gas/Water) : 非凝縮性気体・蒸気表
- PAR(Passive Autocatalytic Hydrogen Recombiner) : 触媒式水素再結合器
- RN(Radionuclide) : 放射性物質の放出・移行挙動
- SPR(Containment Spray) : スプレー液滴／格納容器雰囲気間の熱伝達

MELCORの主な入力データ

パッケージ別の入力データを、データヘッダで区別
(ファイルは分けても分けなくてもよい)

- **CVH:**
幾何データ(流路面積、長さ、体積)、初期条件(大気速度、プール速度、圧力、プール高さ、プール温度等)、その他条件(外部エネルギー源、質量源等)
- **FL:**
幾何データ(流路面積、長さ、高さ、体積、開口率)、初期条件(大気速度、プール速度)、その他条件(接続コントロールボリューム番号、流路の種別)
- **HS:**
幾何データ(分割数、形状(直方体/円柱/球/半球)、高さ、配向、材料組成)、発熱(内部熱源データ、発熱分布)、その他(境界流体温度、温度ノード位置、温度ノード番号、接続ボリューム番号、輻射熱伝達データ、境界面積等)
- **COR:**
炉心/下部プレナムの一般データ、軸レベルデータ、半径リングデータ、各セルの詳細データ、下部ヘッドデータ、下部ヘッド貫通部データ
- **CAV:**
幾何データ、関連付けられるCV番号、コンクリート種別、崩壊熱制御の指定、外部の移動プロセス番号

MELCORの解析事例

原子力規制委員会(旧独立行政法人原子力安全基盤機構)による、
福島第一原子力発電所1号機の解析(MELCOR ver.1.8.5)

出典: <http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/700/12/001/1-6-1.pdf>

IMPACT/SAMPSON

IMPACT (Integrated Modular Plant Analysis with Computer Technologies)

- 平成5年度から平成14年度にかけて旧通商産業省・経済産業省の委託事業の中で旧財団法人原子力発電技術機構が開発し、現在、財団法人エネルギー総合工学研究所が所有
- 軽水炉プラントの定常運転からシビアアクシデントに至る種々の事象を対象としたコードの総称。
- IMPACT/SAMPSON (Severe Accident Analysis Code with Mechanistic, Parallelized Simulations Oriented towards Nuclear Fields) は、シビアアクシデントの総合解析コード

IMPACT/SAMPSONの主な機能

- **原子炉容器内熱水力解析:**
RELAP5がベース
- **燃料棒ヒートアップ挙動解析:**
燃料ペレット・ギャップ・被覆管を考慮した2次元r-z熱伝導モデルを基礎式応力解析に基づく被覆管の膨張・破裂モデル、Zr-水反応モデル、被覆管の脆化破損モデル、ジルカロイと酸化ウランの共晶反応モデル、被覆管の熔融破損モデル
- **燃料内FP放出挙動解析:**
燃料からの核分裂生成物 (FP: Fission Products) 放出モデル、燃料／被覆管ギャップ内移行モデル、デブリベッドからのFP放出、熔融プールからのFP放出等モデル
- **原子炉冷却系内FP移行挙動解析:**
対象はガス状成分・エアロゾル成分のFPの移行
ソースターム研究に基づいた物理的および化学的モデル

IMPACT/SAMPSONの主な機能

- **溶融炉心移動挙動解析:**
対象は溶融燃料、溶融被覆管、溶融制御棒、構造物、水および蒸気、FPガス、He、水素等の成分
気相、液相、固相の質量、運動量、エネルギーの保存則と相間および成分間の相互作用モデル
- **デブリの拡がり、冷却挙動解析:**
床面上の溶融物拡がり: 2次元 $x-y$ でデブリ堆積高さを考慮した擬似3次元体系
溶融物の先端位置: VOF法を適用
デブリ自然循環冷却: 軸対称2次元座標系の質量・運動量・エネルギー式
比エンタルピーから各点の温度と固相率を求め、固相率により流動を停止。
伝熱に関し、クラストと原子炉容器壁のギャップ熱伝達モデル、クラストの亀裂による冷却モデル、デブリベッドモデル等

IMPACT/SAMPSONの主な機能

- **格納容器内熱水力挙動解析:**
格納容器内をセル分割し、雰囲気空間とそれらを囲む構造物(壁、床、天井)でモデル化。
セル間は流路パスで連結、流動計算は、集中定数モデル
構造物は1次元熱伝導方程式
燃焼、格納容器破損・ベント、工学的安全設備(ファンクーラー、スプレイ、サブプレッションプール)、水蒸気爆発トリガリングに関する解析モデル
- **デブリ・コンクリート反応挙動解析**
デブリ(組成)均質モデルとコンクリート浸食モデル
コンクリート浸食モデルは、床面と横面を平面2次元で分割した格子を独立に厚み方向1次元で浸食計算

IMPACT/SAMPSONの主な入力ファイル

- *.poe.dat :
シナリオ指定(各フェーズで起動するモジュールの指定等)
- *.acm.dat :
ACMモジュールの制御データ(ケース名、前のフェーズのケース名、リスタート開始時間[s]、フェーズ終了時間[s](イベント発生しない場合の打ち切り時間))
- dset :
各フェーズのファイル設定制御、前のフェーズの結果フォルダ名、前のフェーズからコピーするファイル番号(前のフェーズの終了時間)
- io/
.tha1.dat、.tha_ifdef.dat、*.frha.dat、*.mcra.dat、*.dca.dat、*.fpra.inp、*.cvpa.dat、*.dsa.dat、*.macr.inp 等:解析モジュールの入力データ

IMPACT/SAMPSONの主な入力データ

①プラントの体系モデル

- 溶融前後熱水力挙動解析モジュール:水力コンポーネントの寸法・接続、熱構造体の寸法・接続・物性、流体機器データ、核特性データ等
- 燃料棒ヒートアップ挙動解析モジュール:燃料棒や制御棒の寸法や分割数、物性
- 溶融炉心移動挙動解析モジュール:構造物の寸法・材質データ、燃料棒ヒートアップ挙動解析モジュールとのセル対応
- 下部プレナムデブリ冷却挙動解析モジュール:X, Y, Z方向のメッシュ分割数と分割幅、圧力容器寸法と分割数、放射率、物性値
- 燃料内FP放出挙動解析モジュール:燃料の寸法・メッシュ分割座標、物性値、FP化学種物性値
- FP移行挙動解析モジュール:各区画の寸法、種別
- 格納容器内熱水力挙動解析モジュール:セルの寸法・接続、熱構造体の寸法・接続・物性、工学的安全設備データ等
- デブリ拡がり挙動解析モジュール:X,Y,Z方向のメッシュ分割数と分割幅、圧力容器寸法と分割数、放射率、物性値
- デブリ・コンクリート反応挙動解析モジュール:下部キャビティ寸法、物性値、放射率

IMPACT/SAMPSONの主な入力データ

②運転条件

- **溶融前後熱水力挙動解析モジュール**: 水力コンポーネントの初期値、熱構造体の初期値、流体機器の初期値等
- **燃料棒ヒートアップ挙動解析モジュール**: 燃料棒各部の初期温度、酸化膜厚さ等
- **溶融炉心移動挙動解析モジュール**: 構造物の初期温度、液相・気相の成分、初期圧力・温度・流速、燃料等の初期成分比
- **下部プレナムデブリ冷却挙動解析モジュール**: 初期温度、各成分の初期質量、クラスト体積
- **燃料内FP放出挙動解析モジュール**: 炉心初期出力、炉心材質の初期質量
- **格納容器内熱水力挙動解析モジュール**: セルの初期値、熱構造体の初期値
- **デブリ拡がり挙動解析モジュール**: 初期温度、各成分の初期質量、クラスト体積
- **デブリ・コンクリート反応挙動解析モジュール**: 各部の成分の初期質量比

IMPACT/SAMPSONの主な入力データ

③事故想定等

- **溶融前後熱水力挙動解析モジュール**: 起因事象の模擬(例、破断口バルブの開、電源喪失によるポンプ停止等)
- **溶融炉心移動挙動解析モジュール**: 破損データ(寸法、破損条件)
- **下部プレナムデブリ冷却挙動解析モジュール**: 貫通配管の溶融温度・破損口径
- **格納容器内熱水力挙動解析モジュール**: 工学的安全設備の起動・停止条件
- **デブリ拡がり挙動解析モジュール**: 貫通配管の溶融温度・破損口径
- **デブリ・コンクリート反応挙動解析モジュール**: コンクリート溶融温度

IMPACT/SAMPSONの主な入力データ

④全体制御

- 計算ケース名、リスタート計算のケース名、リスタート計算のリスタート時間
- 解析終了時刻、解析終了イベント名、リスタートファイル出力間隔
- 主要変数の時系列結果(*.acm.out1)出力間隔、
- タイムステップ(ACMとモジュール間の通信間隔)最大値、タイムステップ(ACMとモジュール間の通信間隔)最小値
- VFFファイルの出力間隔、プリントデータの出力間隔

IMPACT/SAMPSONの解析事例

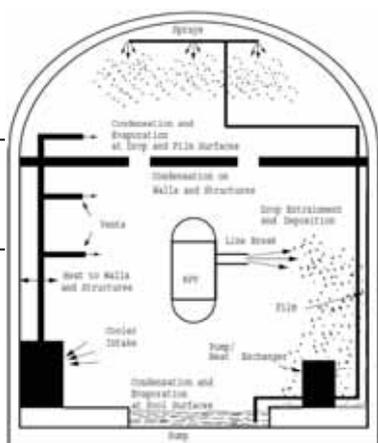
(財)エネルギー総合工学研究所による、
福島第一原子力発電所2号機の解析

出典: <http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/700/12/001/1-7.pdf>

GOTHIC

- GOTHIC (: Generation of Thermal-Hydraulic Information for Containments) は、米国電力研究所(EPRI)とNAI(Numerical Applications Inc.)社が、1989年に開発
- 格納容器内圧挙動解析コードであり、新設プラント申請にも使用
- 中核部分は、1973年のCOBRA-IVに由来し、COBRAコードのバージョンアップの経緯を経て、最終的には1986年のFATHOMSコードをベースとして発展
- 空間はボリュームとしてモデル化、それらをパス(流路)で接続。ボリュームは集中定数系or細分して有限差分法
- ポンプ、弁、スプレイ、熱交換機、イグナイタ、リコンバイナ

GOTHICの流体相

気相 vapor	<ul style="list-style-type: none"> • 蒸気 + 非凝縮ガス成分 (複数) • (ボリューム単位で) 温度と速度は同一 	<ul style="list-style-type: none"> • 各々、ボリューム単位で質量・エネルギー・運動量収支を保つ • 圧縮性を仮定 • 相間、壁との間の質量・エネルギー・運動量の移行を構成式で計算
液滴 drop	<ul style="list-style-type: none"> • (ボリューム単位で) 直径、温度、速度は同一 	
連続液相 continuous liquid	<ul style="list-style-type: none"> • 液滴以外、液膜・プール等 	
ミスト mist	<ul style="list-style-type: none"> • 気相流速で動く • 気相運動方程式で気相密度に加算 • 温度は、蒸気分圧の飽和温度 	
氷 ice	<ul style="list-style-type: none"> • 質量収支のみ保つ • 溶融まで初期温度を保つ 	

GOTHICの主な入力データ

①形状モデル(流体)「Control Volumes」

- **幾何データ**: 体積、底部高さ、高さ(dz)、等価直径、L/V

①'ボリュウムの細分割「Subdivided Volumes」

- 分割数の指定、障害物の設定
- 当該ボリュウムに接続する流路パス、熱構造体、スプレイノズル位置等の指定

②形状モデル(熱構造体)「Thermal Conductors」

- **伝熱データ**: 表・裏の熱伝達タイプ、熱伝導タイプ(*)
- **幾何データ**: 伝熱面積
- **初期条件**: 初期温度

*熱伝導タイプ: 幾何データ(円筒・壁・円柱の指定、厚さ、外径)、メッシュ分割

③流路パス「Flow Paths」

- **幾何データ**: 両端のエレベーションと高さ(dz)、流路面積、水力直径、ベンド角
- **抵抗データ**: 慣性長さ、摩擦長さ、順方向損失係数、逆方向損失係数

GOTHICの主な入力データ

④境界条件「Boundary Conditions」

- 状態量(圧力、温度またはエンタルピー、流量)(*)、高さ
- *: 時系列テーブルで指定可能(「Functions」)、テキストファイルから取込み可能

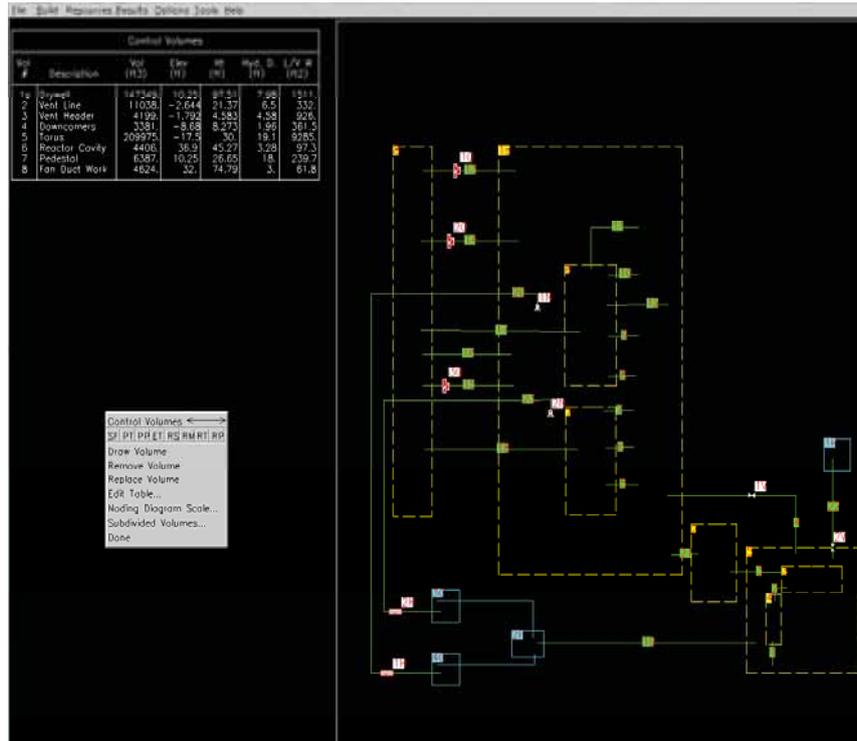
⑤流体機器「Component」

- 各種機器の特性等
(ポンプ・ファン、バルブ・ドア、熱交換器、真空破壊弁、スプレイノズル、クーラー・ヒーター、リコンバイナ、イグナイタ、アイソトープフィルタ、RPVs)

⑥初期条件

- 圧力、気相温度、液相温度、相対湿度、液相体積率、液相成分割合
(ボリュウム別)

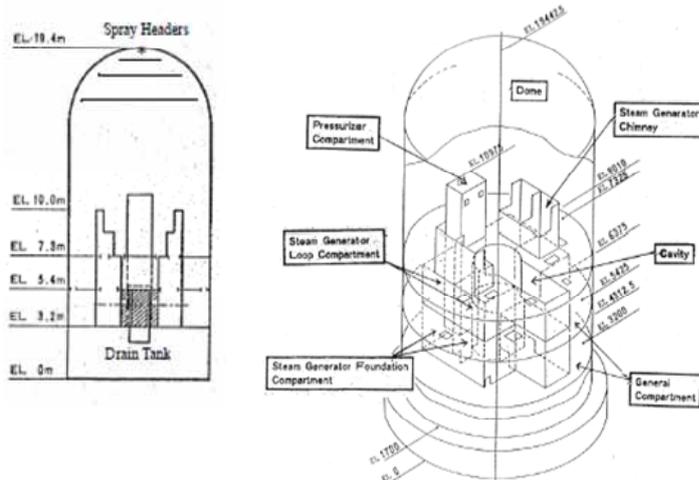
GOTHICの入力画面例



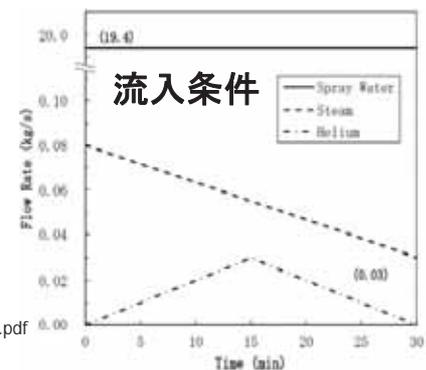
GOTHICの解析事例

実機プラントの大破断LOCA時のECCS失敗を模擬したNUPEC試験

- ・水素の代替であるヘリウムガスの拡散・混合
- ・構造材との熱伝達と内部熱伝導
- ・格納容器スプレイによる効果
- ・OECD/NEAの国際標準問題ISP35として採用

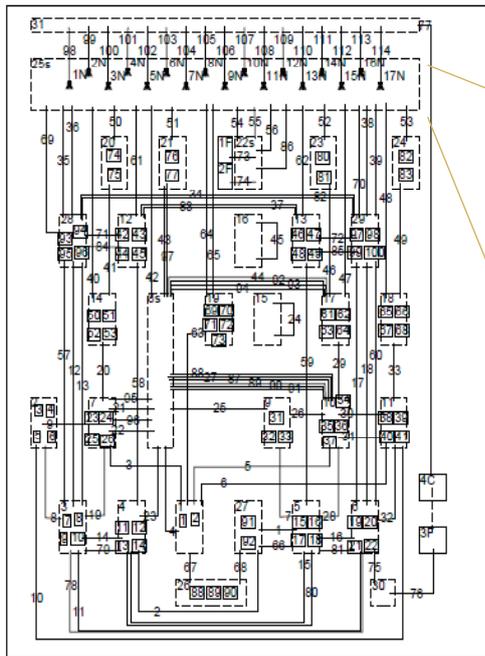


初期条件	
ドーム部圧力	139.7 kPa
ドーム部温度	66.4 °C
ドーム部湿度	100 %
外気温度	11 °C
気相 (ヘリウム/蒸気) 放出	
ヘリウム放出流量	0.0-0.03-0.0 kg/s
蒸気放出流量	0.08-0.03 kg/s
放出ヘリウム温度	14 °C
放出蒸気温度	165 °C
放出期間	30 min
放出位置	Dループ SG基礎区画
スプレイ	
スプレイ流量	19.4 kg/s (70 m ³ /h)
スプレイ水温	40 °C
放出期間	30 min
スプレイ液滴径 (平均液滴径)	0.75 mm
スプレイノズル個	21 個
放出位置	ドーム部

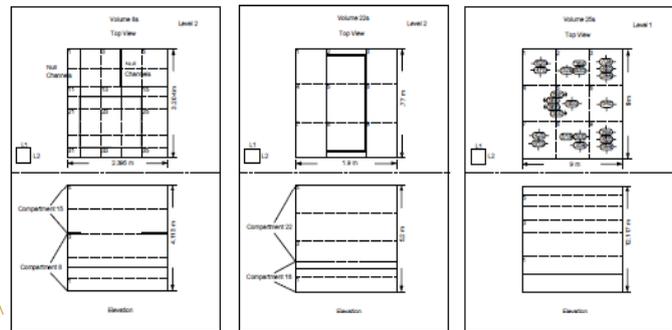


GOTHICの解析事例

出典: Frank Rahn, "GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE QUALIFICATION REPORT Version 7.2b(QA)", NAI 8907-09 Rev 10, (March 2009)



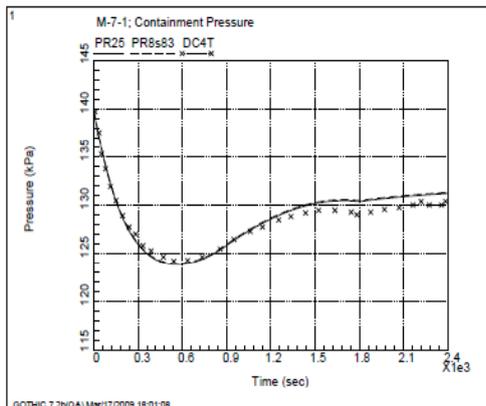
ノーディング



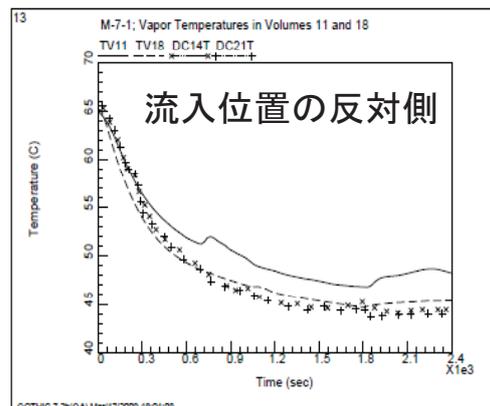
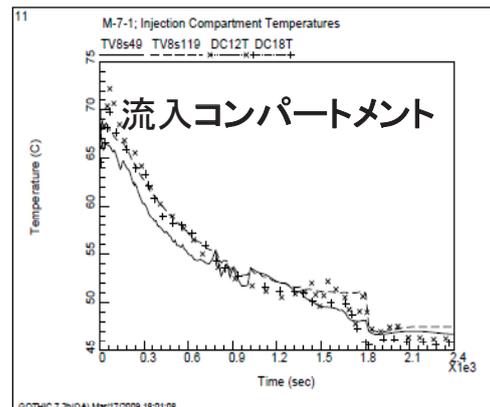
細分メッシュ(上下3層で定義)

GOTHICの解析事例

格納容器圧力



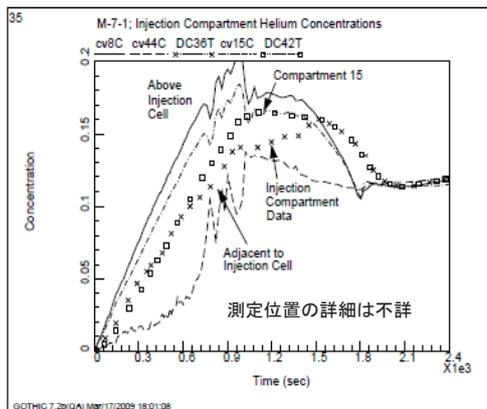
気相温度



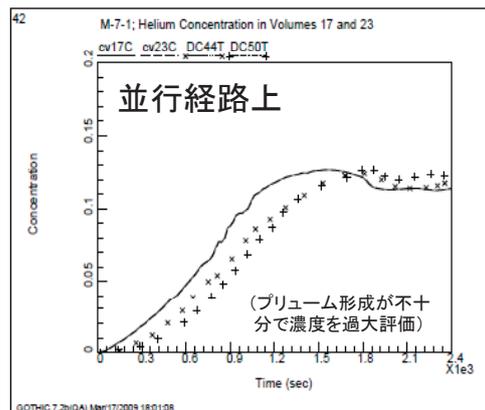
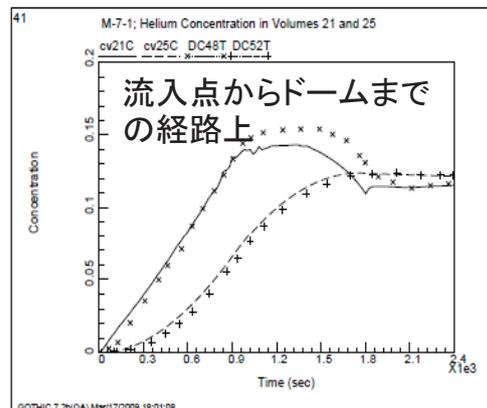
出典: Frank Rahn, "GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE QUALIFICATION REPORT Version 7.2b(QA)", NAI 8907-09 Rev 10, (March 2009)

GOTHICの解析事例

ヘリウム(水素の代替)濃度



流入コンパートメント



出典: Frank Rahn, "GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE QUALIFICATION REPORT Version 7.2b(OA)", NAI 8907-09 Rev 10, (March 2009)

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

シビアアクシデント評価の基礎技術

総合企画部 湊 明彦

原子力安全解析セミナー
2014年11月27日（木）
アドバンスソフト株式会社

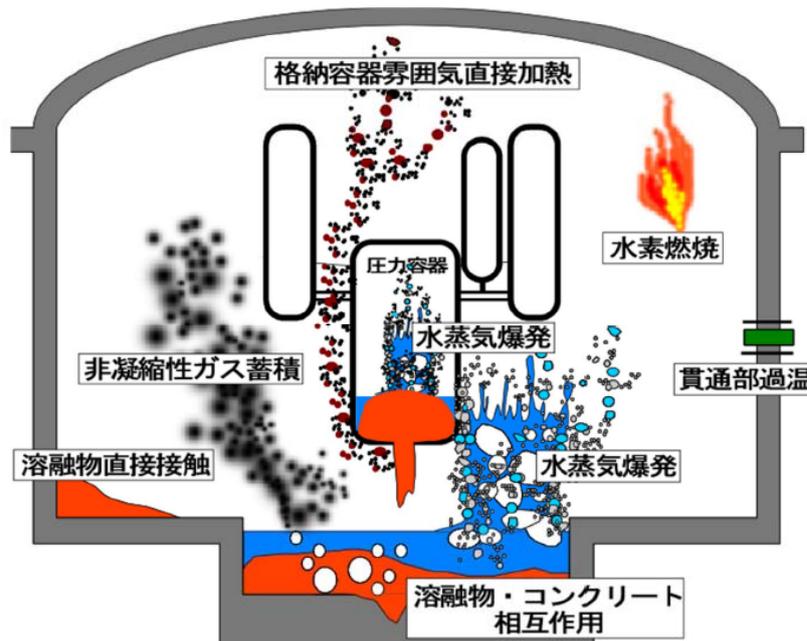
シビアアクシデント評価の精度/信頼性の向上に向けて

マクロ現象のシーケンス解析 + 主要熱流動現象のCFD解析

報告内容

- ・シビアアクシデントの主要な熱流動現象
- ・SAMPSONコードのモジュール
- ・CFD解析例
 - (1)水素爆轟
 - (2)デブリ落下
 - (3)デブリスプレッド
 - (4)デブリ堆積層冷却
 - (5)水蒸気爆発
- ・結言

SAに係る研究について



- ・ 水蒸気爆発
- ・ 格納容器雰囲気直接加熱
- ・ 溶融物・コンクリート相互作用
- ・ 水素燃焼
- ・ 非凝縮性ガス蓄積による格納容器加圧
- ・ 格納容器貫通部加温

梶本光廣, 「連載講座軽水炉の確率論的安全評価 (PSA) 入門 第5回内の事象レベル2 PSA」, 日本原子力学会誌, Vol. 48, No. 8, 571 (2006).

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

3

シビアアクシデント研究の成果

- シビアアクシデント研究及び確率論的安全評価の研究が進み、シビアアクシデントを支配する現象及びシビアアクシデントに至る事故シーケンスが明らかになってきた。
- これらの研究の進捗によって、
 - a) シビアアクシデントに至る事故シーケンスは、比較的少数に類別化ができること、
 - b) シビアアクシデント現象の発生及び緩和に関する拘束条件が明らかにされてきたこと、
 等から、シビアアクシデントに対する具体的な対応策が立案できるようになってきた。

原子力安全委員会、第6回「当面の施策の基本方針の推進に向けた外部の専門家との意見交換-安全確保の基本原則に関すること-」、原子力安全委員会第1・2会議室、虎ノ門三井ビル2F、2011年12月13日
梶本光廣氏資料より

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

4

シーケンスコード SAMPSONの解析モジュール

(図はセミナーのみ表示)

引用) <http://www.iae.or.jp/group/07.html>

事象の進展 

フェーズI	フェーズII	フェーズIII
起因事象 スクラム 燃料溶融 リロケーション 圧力容器破損	デブリ落下・堆積 水蒸気爆発 コンクリート浸食 デブリ層過熱 格納容器破損	水素爆発(爆轟) 建屋破損

CFD評価の
課題

■燃料溶融/流下
(キャンドリング)

■デブリ落下・堆積

■水素爆発(爆轟)

■水蒸気爆発

■コア-コンクリート反応

■デブリスプレッド

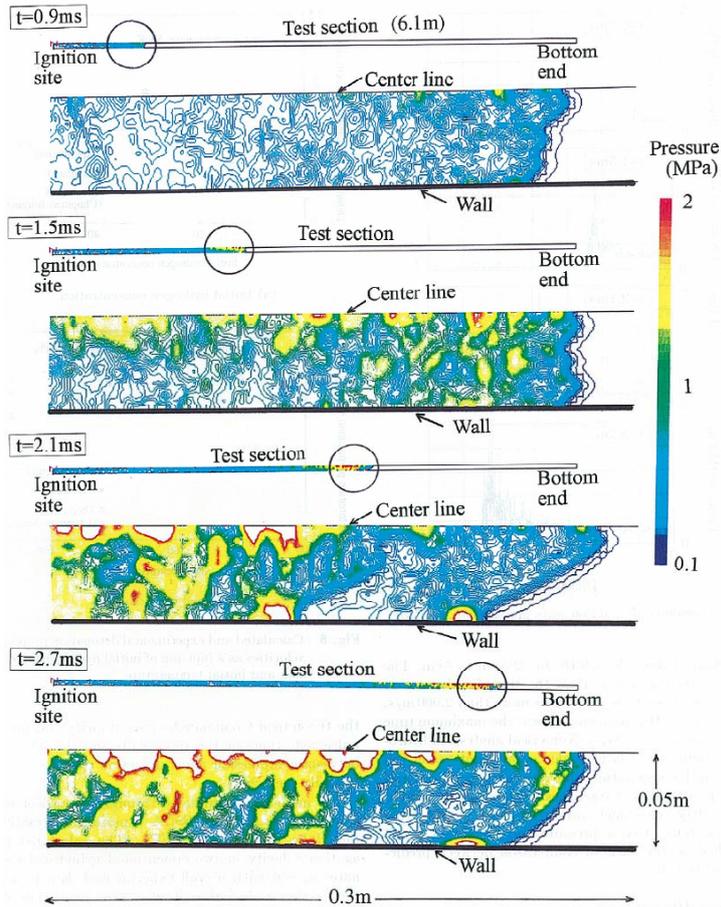
■デブリ堆積層冷却

 解析例を紹介

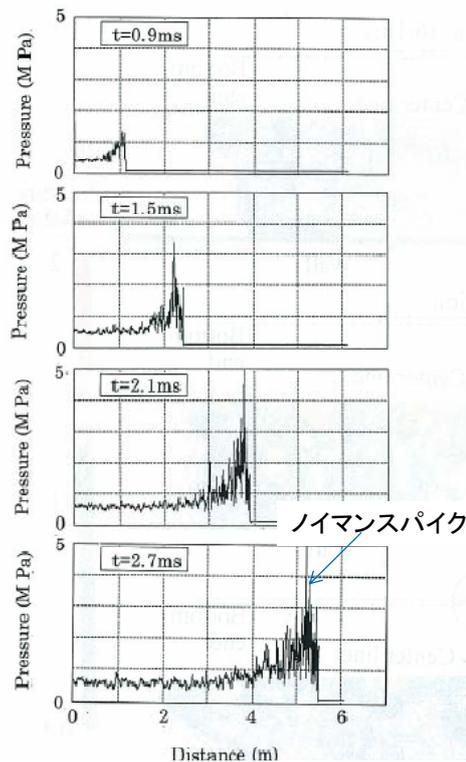
水素爆轟解析 (波面近傍の圧力分布)

- ・圧縮性気体3次元解析
- ・爆轟波面の保存量束の連続性
(ランキン-ユゴニオ関係式)
- ・燃焼熱による爆轟波面エネルギーギャップの遷移
(チャプマン-ジュゲ関係式)

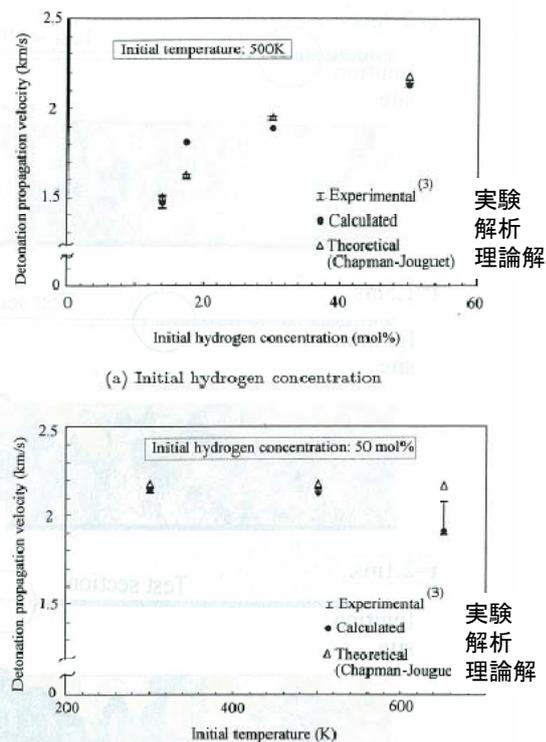
引用: Minato, A., Tanaka, N.
JNST, 35[4], p.278, (1998)



爆轟波伝播解析結果



伝播速度解析のBNL実験との比較



引用: Minato, A., Tanaka, N.
JNST, 35[4], p.278, (1998)

実機条件の水素爆燃解析

(図はセミナーのみ表示)

ブラスト波の伝播解析

引用: Breitung, W., Analysis Methodology for Hydrogen Behaviour in Accident Scenarios, Proc. Int. Conf. on Hydrogen Safety (2006)

水蒸気爆発モデル(JASMINEコード)



(図はセミナーのみ表示)

メルトジェット貫入

メルト液滴分離

微細化,爆発

引用: Moriyama, K., Takagi, S., Muramatsu, K., Nakamura, H., Maruyama, Y., Evaluation of Containment Failure Probability by Ex-Vessel Steam Explosion in Japanese LWR Plants, JNST, 43[7], p.774 (1006)

水蒸気爆発の熱流動シミュレーション

(図はセミナーのみ表示)

引用: Moriyama, K., Takagi, S., Muramatsu, K., Nakamura, H.,
Maruyama, Y., Evaluation of Containment Failure
Probability by Ex-Vessel Steam Explosion in
Japanese LWR Plants, JNST, 43[7], p.774 (1006)

水蒸気爆発解析と実験(KROTOS)の圧力履歴比較

(図はセミナーのみ表示)

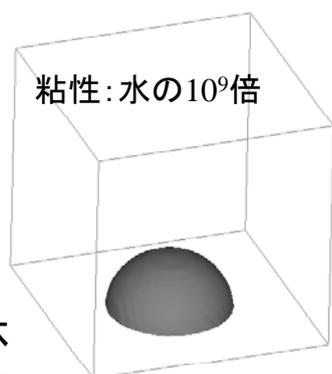
KROTOS26

KROTOS28

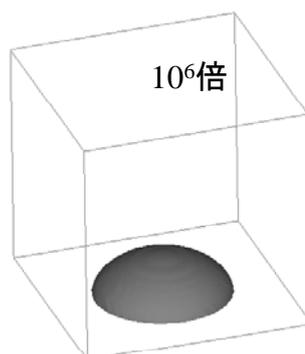
引用: Yang, Y., Moriyama, K., Maruyama, Y., Park, H.S., Sugimoto, J.
Propagation Calculation for Steam Explosion with
JASMINE-Pro Code, ICONE-7235 (1999)

高粘性流体の解析

高粘性流体
運動量拡散
速度による
不安定緩和

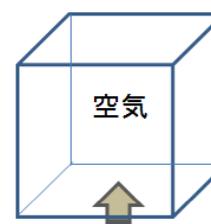


粘性係数 $10^6 \text{Pa}\cdot\text{s}$

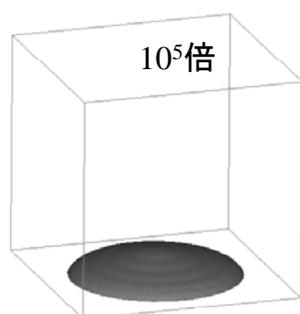


粘性係数 $10^3 \text{Pa}\cdot\text{s}$

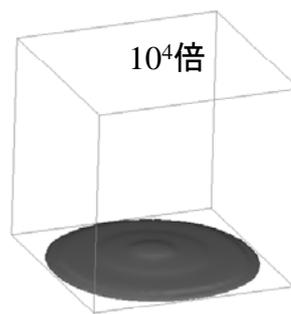
解析領域 0.5m立方
密度 1000kg/m^3



粘性流体湧出し(0.1m/s)
(7.2cm平方開口から6秒間)



粘性係数 $10^2 \text{Pa}\cdot\text{s}$



粘性係数 $10^1 \text{Pa}\cdot\text{s}$



粘性係数 $1 \text{Pa}\cdot\text{s}$

非ニュートン流体の自由液面流解析

(図はセミナーのみ表示)

非構造格子のガラキン法離散化, 界面追跡のラグランジェ計算

- ・粘弾性/ビンガム流体
- ・溶融/固化と潜熱

引用:

Vola,D.,Babik,F.J-C.Latche
On a Numerical Strategy to Compute Gravity Current
Of Non-Newtonian Fluids, J. Comp. Phy., 201,p.397 (2004)

デブリ粒子落下・堆積解析のモデル

(図はセミナーのみ表示)

沸騰流れの中に
粒子群を投入し
軌跡を計算

着床粒子の
堆積計算

堆積層を更新し
沸騰流れを計算

引用: Yakush, S.E., Kudinov, P., Din, T-N., Multiscale Simulations of Self-Organization Phenomena in the Formation and Coolability of Corium Debris Bed, NURETH-13, N13P1143 (2009)

沸騰プールへの デブリ粒子 落下・堆積解析

(図はセミナーのみ表示)

引用: Yakush, S.E., Kudinov, P., Din, T-N., Multiscale Simulations of Self-Organization Phenomena in the Formation and Coolability of Corium Debris Bed, NURETH-13, N13P1143 (2009)

狭隘ギャップの限界熱流束解析

Table 1 Steam and Water Properties

Density	Steam	0.598 kg/m ³
	Water	958.12 kg/m ³
Kinematic viscosity	Steam	20.54 × 10 ⁻⁶ m ² /s
	Water	0.2945 × 10 ⁻⁶ m ² /s
Eddy viscosity coefficient		10.0
Surface tension		58.92 × 10 ⁻³ N/m
Latent heat		2256.9 kJ/kg

(Saturated steam and water at 0.1MPa)

加熱域
ギャップ幅2mm

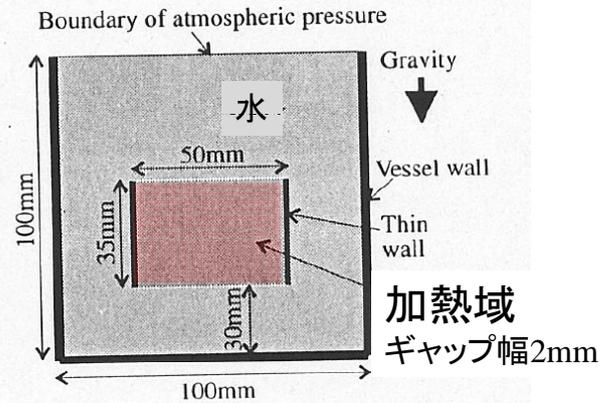
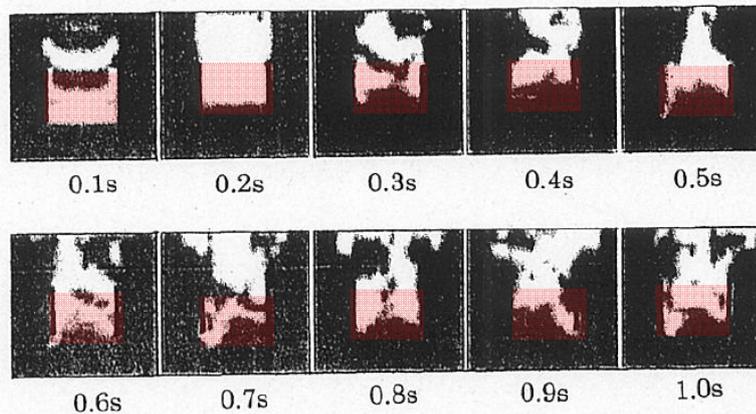


Fig. 1 Calculation Conditions of Boiling in a Gap for Simulation of Tests by Monde, et al.

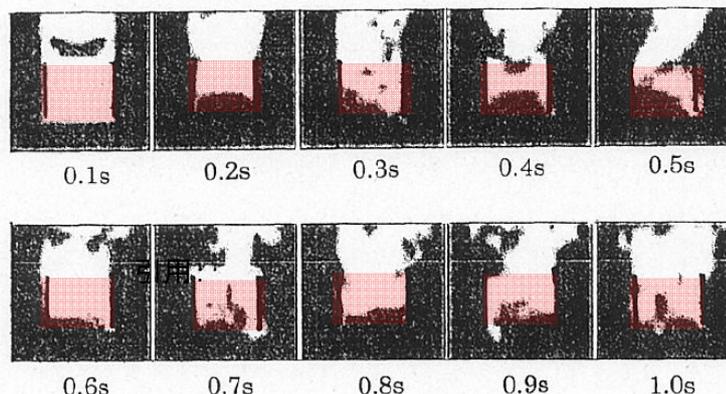
引用: Minato, A., Takamori, K., Ishida, N. NTHAS98 (1998)

50% CHF



Monde実験
のCHF条件

100% CHF



引用:

Minato, A., Takamori, K., Ishida, N., NTHAS98 (1998)

発熱堆積層冷却の解析

(図はセミナーのみ表示)

- ・多孔質内の二相流,CCFL
(ダルシー則,毛管圧)
- ・チャネリング,ギャップ形態
- ・多孔質とプールの同時計算

引用 Buerger,M.,Buck,M.,Schmidt,W.,Widmann,W.,
Validation and Application of the Wabe code,
Investigations of Constitutive Laws and 2D Effect
On Debris Coolability, NED, 236, p.2164 (2006)

19

(図はセミナーのみ表示)

Buerger,M.,Buck,M.,Schmidt,W.,Widmann,W.,
Validation and Application of the Wabe code,
Investigations of Constitutive Laws and 2D Effect
On Debris Coolability, NED, 236, p.2164 (2006)

20

結言

主要熱流動現象のCFD解析例を紹介した。

- (1)水素爆轟
- (2)デブリ落下
- (3)デブリスプレッド
- (4)デブリ堆積層冷却
- (5)水蒸気爆発

課題

- ・実験に依存しない機構論的モデルの開発
- ・実験, 福島第一の知見との比較による検証
- ・大規模/高速計算による実機解析
- ・マクロ現象シーケンスコード(SAMPSON, MELCORなど)
と統合した総体的な評価精度向上

気液二相流解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/MP による沸騰現象などの3次元気液二相流解析

第2事業部 杉中 隆史

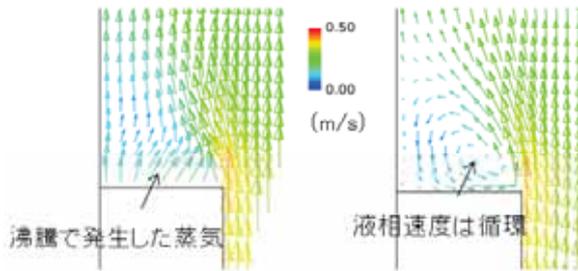
原子力安全解析セミナー
2014年11月27日（木）
アドバンスソフト株式会社

発表内容

- Advance/FrontFlow/MPとは？
- Advance/FrontFlow/MPの特長
- Advance/FrontFlow/MPの構成
- Advance/FrontFlow/MPの解析機能一覧
- Advance/FrontFlow/MPの原子力分野における解析事例
- 解析事例 沸騰を伴う解析①
- 解析事例 沸騰を伴う解析②
- 解析事例 凝縮を伴う解析
- 解析事例 相変化を伴わない気泡流解析①
- 解析事例 相変化を伴わない気泡流解析②
- 解析事例 自由表面解析
- 解析事例 気泡合体解析
- Advance/FrontFlow/MPのロードマップ

Advance/FrontFlow/MP とは？

Advance/FrontFlow/MPとは、**アドバンスソフト(株)**が開発し、**二流体モデル**(*)により、**非構造格子系**で気液二相流を解析するソフトウェアである。



同一メッシュにおいて、気相と液相の異なる速度や温度を、各相の非定常過程を考慮して計算できる。

(a)気相速度

(b)液相速度

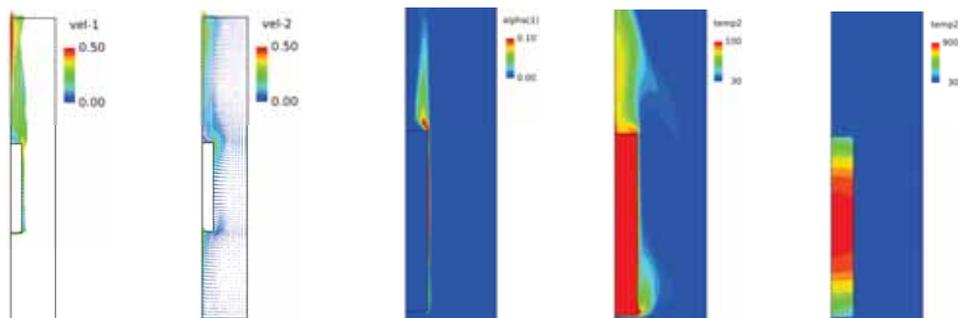
沸騰凝縮を伴う気液二相流と固体内熱伝導との連成解析

(*)二流体モデル:

- ・気相と液相で、質量・運動量・エネルギーの保存方程式を別々に解く。
- ・気液界面や壁面での質量・運動量・熱移動は、構成方程式(実験相関式)を使用する。
- ・メッシュ内に気泡や液滴が含まれても、それらの質量を保存できる。
→メッシュサイズや時間刻みが大きくとれ、大きなスケールの解析ができる。

Advance/FrontFlow/MP の特長

- ①沸騰や凝縮や自由表面の計算を安定に行うことができる。
- ②壁面熱伝達モデルなどの構成方程式が組み込まれている。
- ③気泡合体モデルにより、気泡群の個別運動と相互作用を扱える。
- ④凝集モデルにより、固体粒子群の個別運動と相互作用を扱える。



(a)気相速度

(b)液相速度

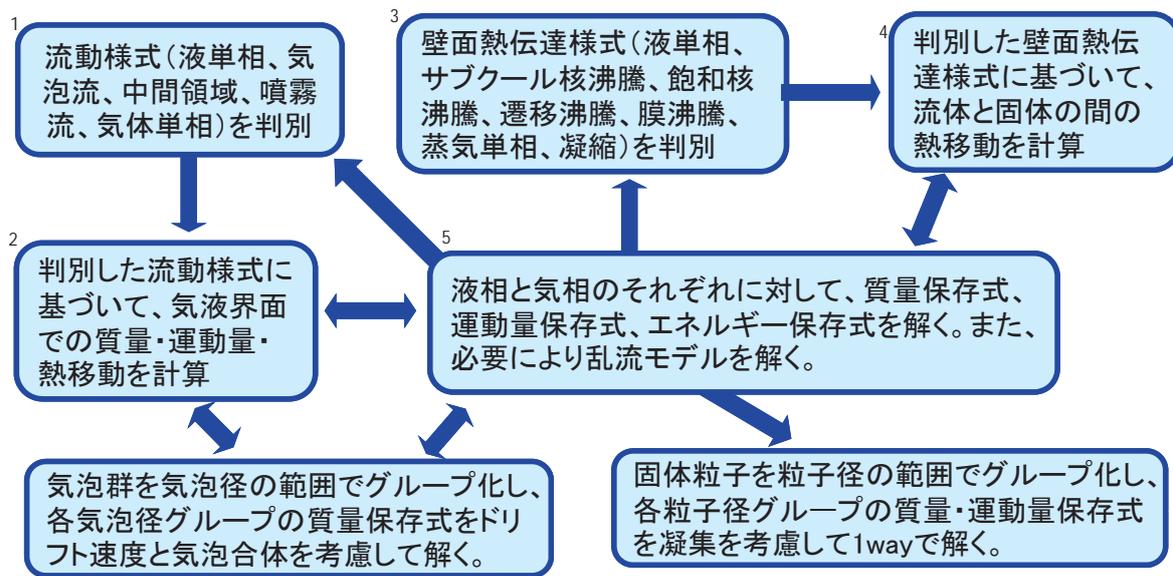
(c)ボイド率

(d)液相温度

(e)固体温度

沸騰凝縮を伴う気液二相流と固体内熱伝導との連成解析

Advance/FrontFlow/MPの構成



非構造格子を使用 ⇒ 形状模擬精度が高い。
 並列計算が可能 ⇒ 大規模な気液二相流解析に適用できる(CPU数に関係なく定額)。

Advance/FrontFlow/MPの解析機能一覧(1/3)

項目	機能
物理モデル	<p>基本機能: 定常／非定常／非圧縮性／強制対流／自然対流／固体の熱伝導(固体内部の複数材質含む)</p> <p>乱流モデル: 混合型k-εモデル／分散型k-εモデル(気泡流用)／渦粘性一定／乱流モデルなし</p> <p>気液二相流の扱い: 二流体モデル</p> <p>蒸発問題での気液二相の扱い: 非凝縮ガス(例えば空気)と凝縮ガスの混合ガスを気相、液滴群を液相として、凝縮ガスの分布を計算</p> <p>気泡径分布変化: ポピュレーションバランス方程式</p> <p>気泡合体モデル: Prince&Blanchモデル／Luohモデル／Chestersモデル／Lehrモデル</p> <p>固体粒子の凝集: 粒径グループ毎の質量・運動量方程式(1way)</p>
構成方程式(実験関連式)	<p>流動様式: ボイド率で分類するモデル／ボイド率と質量速度で分類するモデル／混相は気泡流</p> <p>気泡径: 臨界ウェーバー数を使用した式／一定値</p> <p>液滴径: 臨界ウェーバー数を使用した式／一定値</p> <p>抗力係数: 神戸大・富山らの式／剛体球の式／一定値</p>

Advance/FrontFlow/MPの解析機能一覧(2/3)

項目	機能
構成方程式 (実験相関式)	<p>揚力係数: 神戸大・富山らの式 / 一定値 / 使用しない</p> <p>壁面潤滑力: Antalらのモデル / 使用しない</p> <p>乱流拡散力: Lopezらのモデル / 使用しない</p> <p>仮想質量力: 一定値 / 使用しない</p> <p>最小安全膜沸騰温度: 液温と壁温と圧力による相関式 / 一定値</p> <p>限界熱流束温度: Chenの核沸騰相関式とZuberの限界熱流束相関式から求める方法 / 一定値</p> <p>界面熱伝達: 気泡流 / 噴霧流 / 中間領域</p> <p>壁面熱伝達率: 液単相 / サブクール核沸騰 / 飽和核沸騰 / 遷移沸騰 / 膜沸騰 / 蒸気単相 / 組み込み式の修正 / 一定値</p>
メッシュ 形状	6面体(ヘキサ) / 4面体(テトラ) / 3角柱(プリズム) / 4角錐(ピラミッド) / これらメッシュの混合
離散化	有限体積法 / 節点中心法
アルゴ リズム	SIMPLE法 / Rhie-Chow補間法による圧力振動の抑制 / Muzaferijaの手法による拡散項の精度向上

7

Advance/FrontFlow/MPの解析機能一覧(3/3)

項目	機能
時間積分	Euler陰解法 / クランク・ニコルソン法
移流項の 離散化	1次精度風上差分 / 2次精度風上差分 / 2次精度中心差分 / 2次精度風上差分+リミタ(TVD法) / 2次精度中心差分と1次精度風上差分のブレンド
行列解法	ICCG法 / Bi-CGSTAB法
並列計算	自動領域分割による並列計算
メッシュ作成	市販メッシュャーの利用
可視化	市販可視化ソフトの利用 / フリーソフトParaviewの利用
ユーザー サブルーチン	初期値 / 流入境界条件 / 質量・運動量・エネルギーのソース項 / ポスト処理 / 界面摩擦モデル / 壁面熱伝達モデル / 相変化速度 / 気泡合体のソースターム

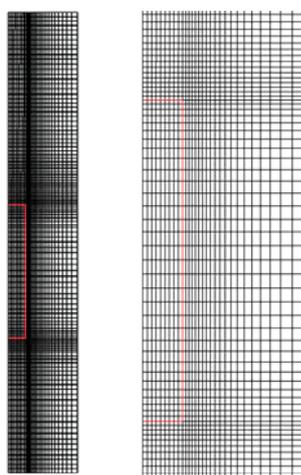
Advance/FrontFlow/MPの 原子力分野における解析事例

- BWR燃料集合体試験詳細解析
- 新型炉燃料集合体詳細解析
- 新型炉気水分離器詳細解析
- 気流ジェット噴流装置の解析
- 垂直管の環状流解析
- 水平管の環状流解析
- 地震時プール水のスロッシング解析
- 配管の沸騰・凝縮による熱疲労解析
- 気泡流解析
- 高温固体と気液二相流の沸騰・凝縮を伴う熱連成解析

解析事例 沸騰を伴う解析①

(目的) 沸騰凝縮を伴う気液二相流と固体内熱伝導との連成機能の検証

円柱の長さ: 32mm
円柱の直径: 8mm



全体図

拡大図

計算格子

2次元軸対称モデルを使用して、600°Cの銀の円柱を100°Cの水槽に置いた状態を初期値として、30秒間の冷却曲線を計算して、文献[1]の実験値と比較する。

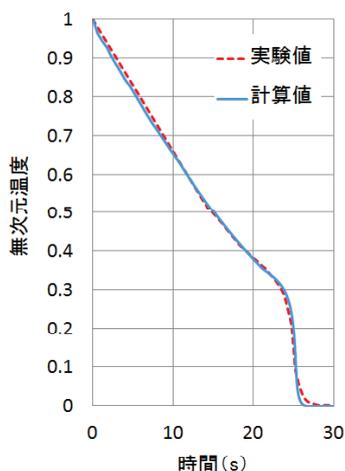
- (1) 時間刻み: 0.005秒一定
- (2) 現象時間: 30秒
- (3) 節点数: 10,503
- (4) 基礎方程式: 二流体モデルと固体の熱伝導方程式
- (5) 流動様式: ボイド率から液体単相、気泡流、中間領域、噴霧流、気体単相に分類して、各構成方程式を使用
- (6) 気泡流の界面摩擦力: 富山らの式
- (7) 噴霧流の界面摩擦力: 剛体球の式
- (8) 中間領域の界面摩擦力: 気泡流と噴霧流の界面摩擦力を3次式で補間
- (9) 壁面熱伝達: 液単相、サブクール核沸騰、飽和核沸騰、遷移沸騰、膜沸騰、気体単相に分類して、各構成方程式を使用
- (10) 最小安全膜沸騰温度: 実験値を使用

参考文献

- [1] 山田, タカシ; 茂地, 徹; 桃木, 悟; 金丸, 邦彦, 有限長の垂直円柱まわりの過渡膜沸騰熱伝達に関する研究(第1報): 実験, 長崎大学工学部研究報告 Vol.28(51) p.139-142, 1998. 10

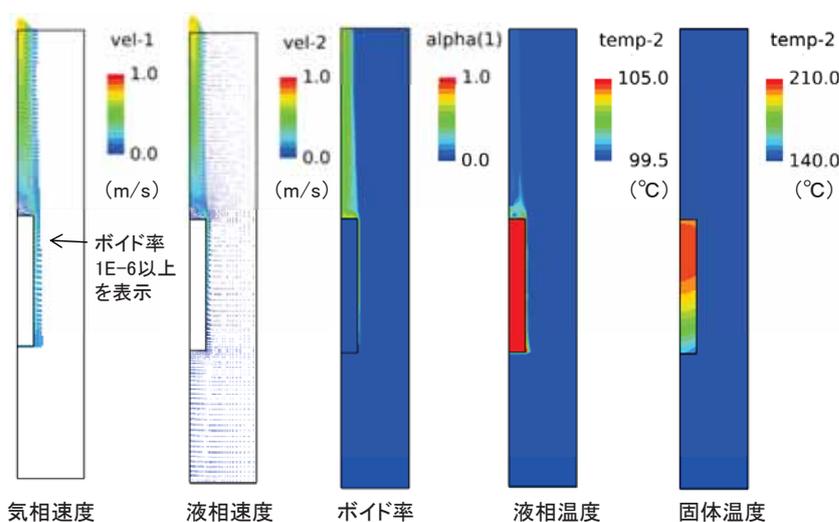
解析事例 沸騰を伴う解析①

円柱中央位置の冷却曲線



$$\text{無次元温度} = \frac{\text{円柱中央位置の温度} - 100}{600 - 100}$$

25秒後(遷移沸騰時)の計算結果



計算時間 OS : CentOS
 CPU : Intel(R) Xeon(R), 2.80GHz
 コンパイラー : Intel
 時間刻み : 0.005sec一定
 並列数 : 1
 現象30秒までの計算時間 : 2時間28分

解析結果:構成方程式をフィッティングすれば冷却曲線の実験値を再現することが可能。

解析事例 沸騰を伴う解析②

(目的) 30°Cの液体に900°Cの固体を入れた時の沸騰解析

■ 解析条件

- ・固体形状 : 長さ32mm、直径8mmの円柱
- ・固体の材質 : 金属(相変態は考慮しない)
- ・固体の初期温度 : 900°C
- ・液体の初期温度 : 30°C
- ・壁面の熱伝達様式 : 「気体単相の対流」、「膜沸騰」、「遷移沸騰」、「飽和核沸騰」、「サブクール核沸騰」、「液体単相の対流」に区別して、熱伝達様式に応じた構成方程式
- ・固体角部での蒸気膜崩壊の扱い
 - Case1 : 特別なモデルを使用しない。
 - Case2 : 壁面に隣接するボイド率が限界値以下になったら蒸気膜が崩壊する。

■ 計算時間

- ・OS : CentOS
- ・CPU : Intel(R) Xeon(R), 2.80GHz
- ・コンパイラー : Intel
- ・時間刻み : 0.03sec
- ・現象30秒(1000step)の計算時間

ケース	シングル	並列数2
Case1	39分07秒	20分34秒
Case2	39分39秒	20分40秒

解析事例 沸騰を伴う解析②

■ 計算格子 自由流出・自由流入条件

節点数: 10,503
(節点中心法のため奥行き3点)

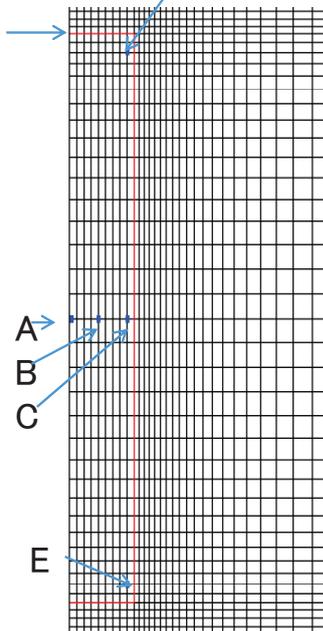
赤色は固体の外形線

中心軸

全体図

赤色は固体の外形線

4mm D



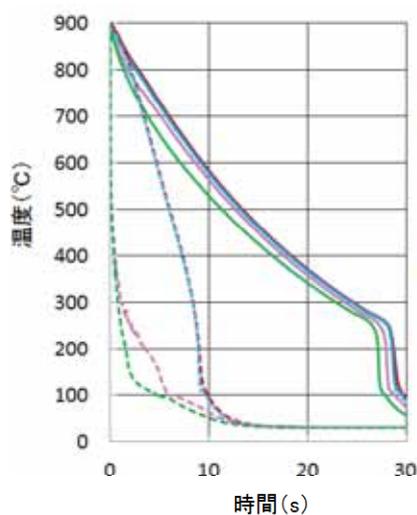
free-slip・断熱条件

拡大図(冷却曲線の出力位置A,B,C,D,E)

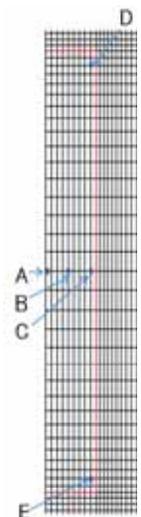
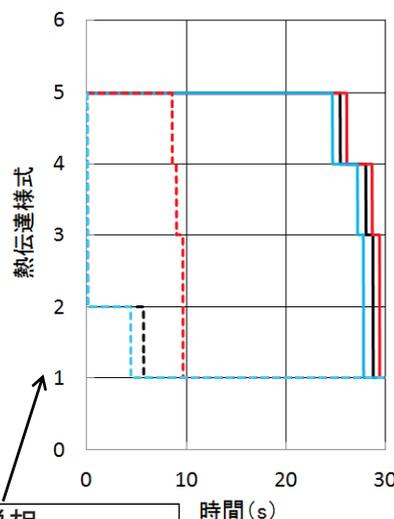
13

解析事例 沸騰を伴う解析②

■ 冷却曲線



■ 熱伝達様式の時間変化



Case2では、コーナー付近のDとEは蒸気膜が崩壊して固液が接触して急冷し、その影響がAに及ぶ。

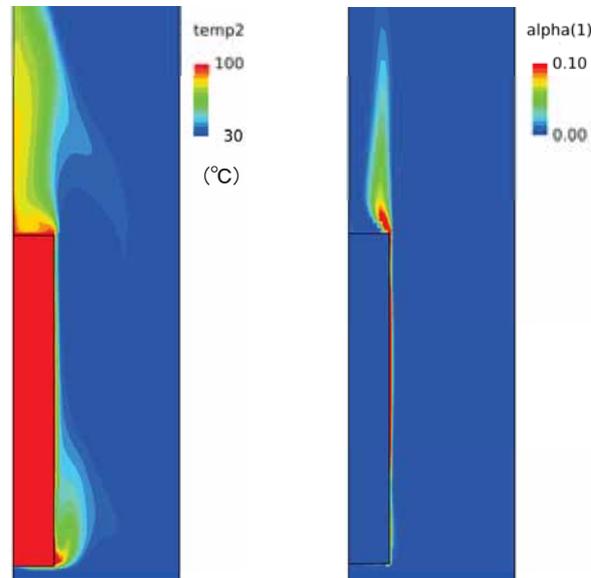
- 6: 気体単相
- 5: 膜沸騰
- 4: 遷移沸騰
- 3: 飽和核沸騰
- 2: サブクール核沸騰
- 1: 液体単相

Case2では、コーナー付近のDとEはすぐに「サブクール核沸騰」状態になる。

14

解析事例 沸騰を伴う解析②

■温度とボイド率(Case2の1秒後)



液相と固体の温度

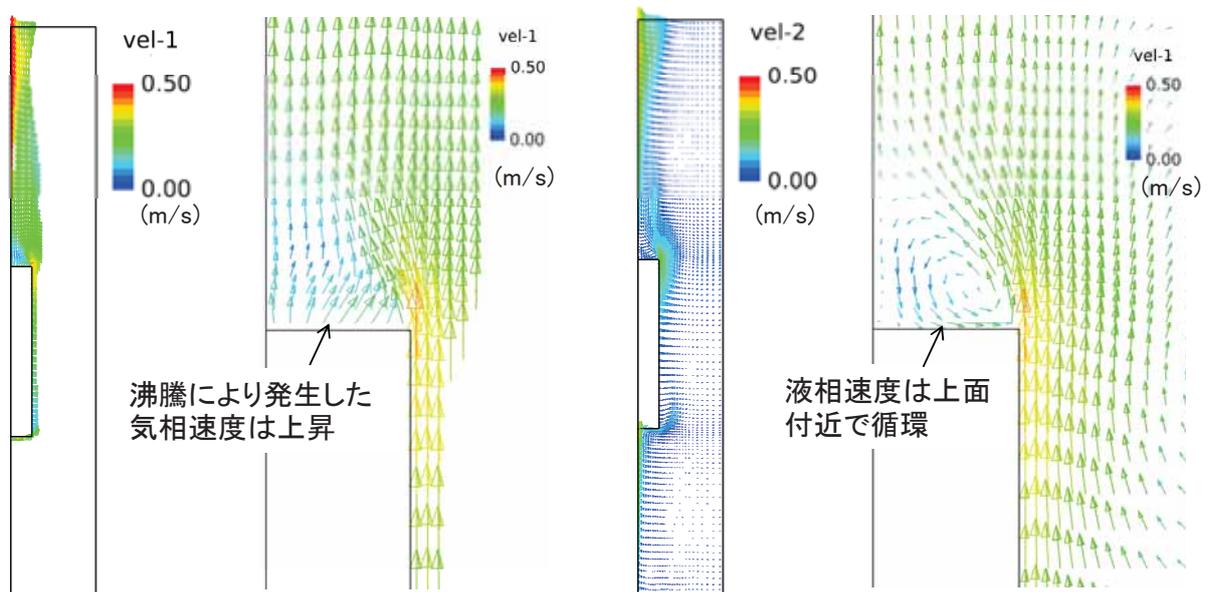
ボイド率

レンジの最大値を超える場所は赤色で表示

解析事例 沸騰を伴う解析②

■速度(Case2の1秒後)

気相速度はボイド率が 10^{-4} 以上の場所を表示



沸騰により発生した気相速度は上昇

液相速度は上面付近で循環

気相速度(全体図)

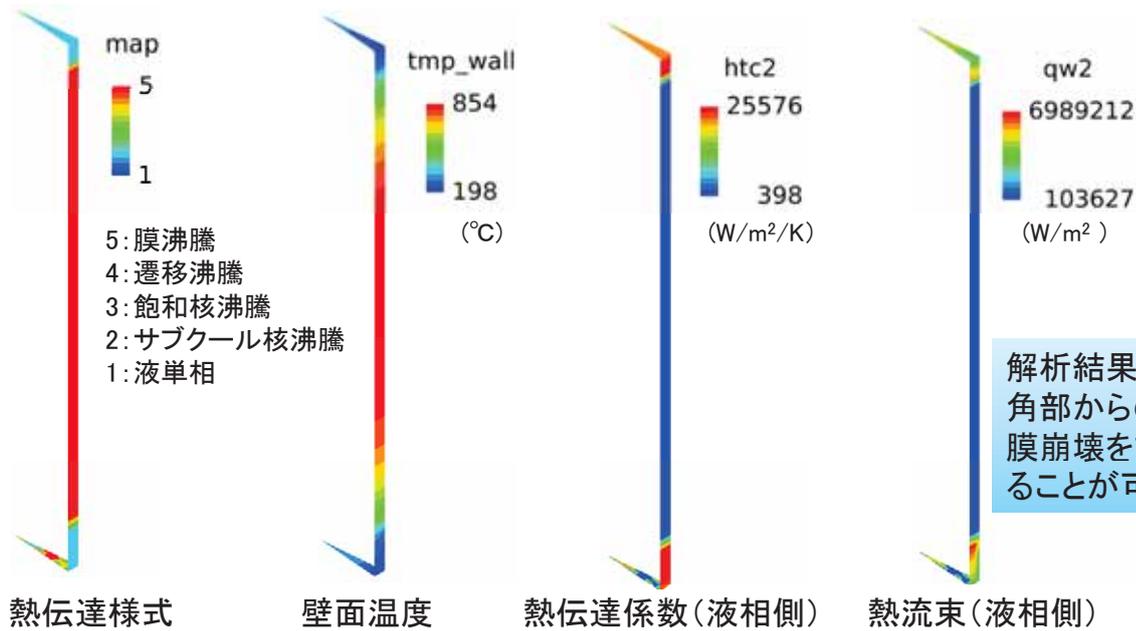
気相速度(拡大図)

液相速度(全体図)

液相速度(拡大図)

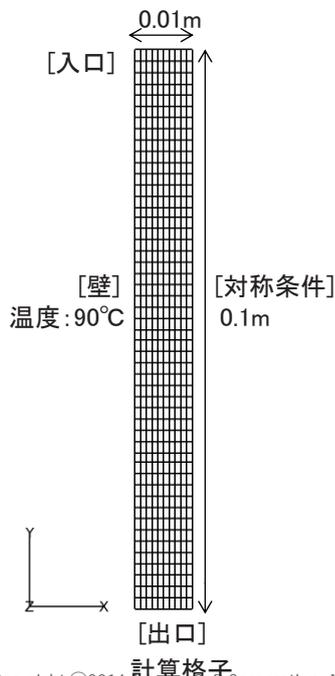
解析事例 沸騰を伴う解析②

■壁面上の物理量(Case2の1秒後)



解析事例 凝縮を伴う解析

ボイド率: 0.9999999
温度: 100.1°C
速度: 0.1m/sと1m/s



(目的) 垂直平板における凝縮解析の検証

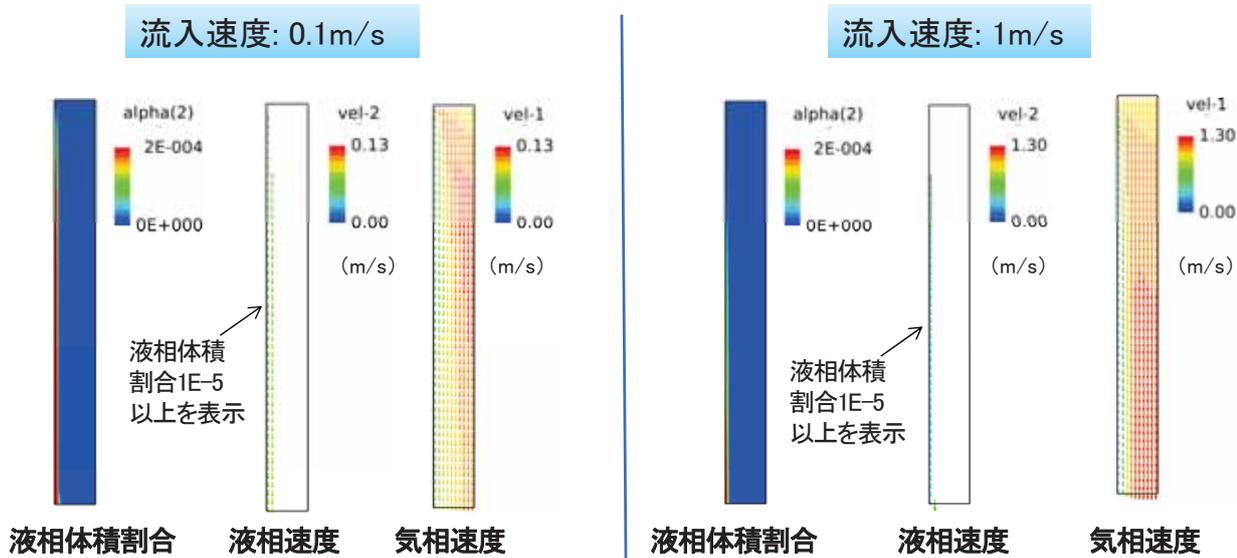
■解析条件

- ・時間刻み: 1秒一定
- ・メッシュ形状: ヘキサ
- ・節点数: 1,683
- ・流動様式: ボイド率から液体单相、気泡流、間領域、噴霧流、気体单相に分類して、各構成方程式を使用
- ・噴霧流の界面摩擦力: 剛体球の式
- ・壁面熱伝達: 凝縮熱伝達係数^[1]
- ・飽和温度: 100°C
- ・流体の物性値: 1気圧、100°Cの物性値
- ・流体の初期温度: 100.1°C
- ・境界条件: 左の図を参照

[1] 上原春男, 木下英二, "鉛直面上の体積力対 流の波流および乱流膜状凝縮平均熱伝達係数の整理式", 機論, 63-616B(1997)4013-4020.

解析事例 凝縮を伴う解析

■解析結果



解析結果：時間刻み1秒で凝縮を安定に計算することが可能。

解析事例 相変化を伴わない気泡流解析①

(目的) 気液二相流解析の基本機能の精度検証

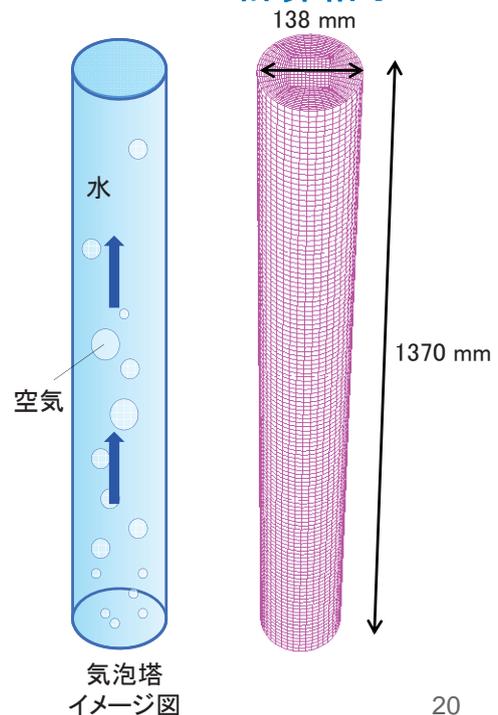
- ・反応器の性能評価
- ・流体の混合や気液相間での輸送と反応器の設計条件や実験条件の関係を解明
- ・気泡塔(気液反応装置)底面からの気体流入時の気相体積割合(ガスホールドアップ/ボイド率)と液相速度の実験値*の再現性の検証

* J.H.Hills, Trans.Instn.Chem.Engrs, Vol52,1971,pp1-9

■解析条件

- ・気泡径: 3 mm
- ・物性値 液相: 密度 1000 kg/m³
気相: 密度 1.2 kg/m³
- ・ガス通気量: 空塔速度 3.8 cm/s
- ・流動様式(構成方程式): 気泡流
- ・解析格子 91,000

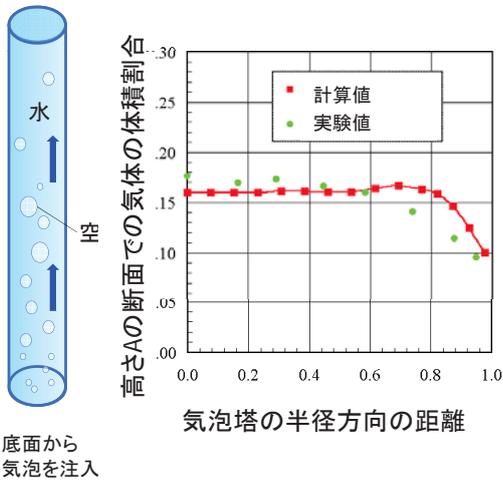
■計算格子



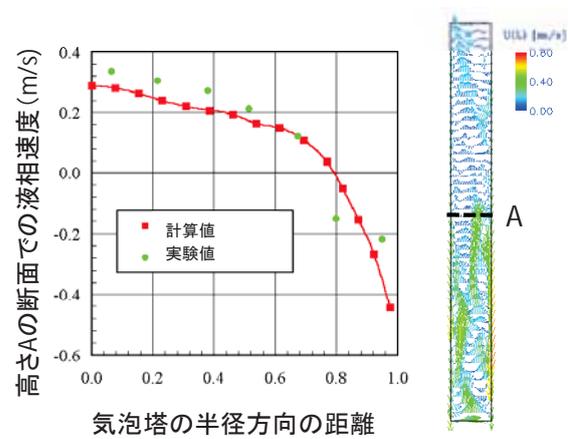
解析事例 相変化を伴わない気泡流解析①

■ 解析結果

ボイド率: 実験値と計算値の比較



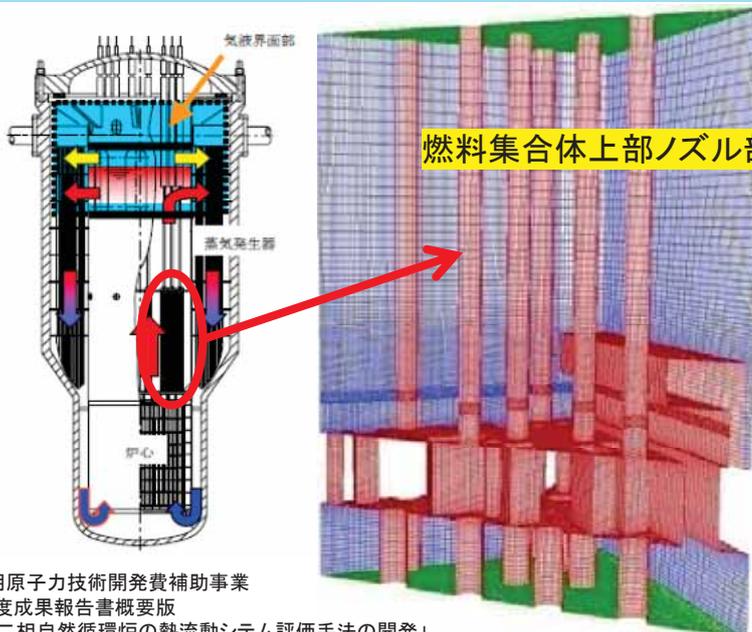
液相速度: 実験値と計算値の比較



解析結果: 実験値に近い値を再現。

解析事例 相変化を伴わない気泡流解析②

(目的) 燃料集合体上部ノズル部において、複雑に変化する流路形状が気液二相流挙動に与える影響を評価する。



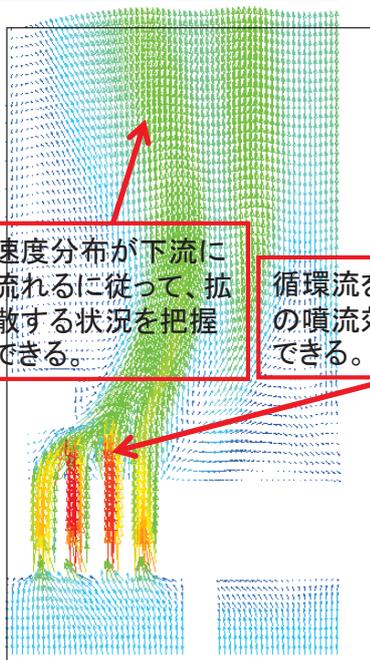
- ・ 格子形状 :
 - 6面体格子
 - 5面体格子
 - 4面体格子
 } 併用
- ・ 解析格子数 :
 - 要素数170万

出典:
 革新的実用原子力技術開発費補助事業
 平成18年度成果報告書概要版
 「高温高圧二相自然循環炉の熱流動シミュレーション評価手法の開発」

解析事例 相変化を伴わない気泡流解析②

■ 解析結果

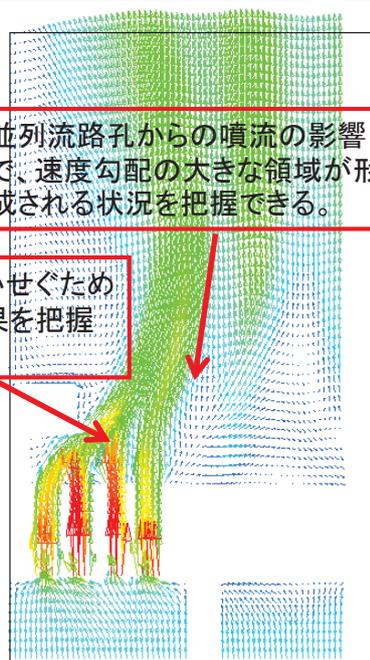
解析結果: 液相速度



速度分布が下流に流れるに従って、拡散する状況を把握できる。

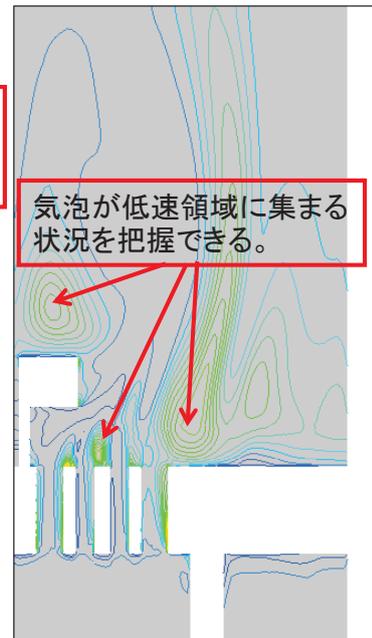
循環流をかせぐための噴流効果を把握できる。

解析結果: 気相速度



並列流路孔からの噴流の影響で、速度勾配の大きな領域が形成される状況を把握できる。

解析結果: 水蒸気の体積割合



気泡が低速領域に集まる状況を把握できる。



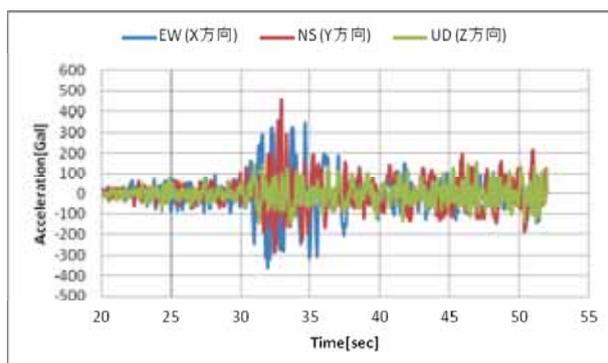
出典: 革新的実用原子力技術開発費補助事業 平成18年度成果報告書概要版
「高温高圧二相自然循環炉の熱流動システム評価手法の開発」

解析事例 自由表面解析

■ 解析条件

(目的) 円筒タンクのスロッシング解析における波高と壁面圧力の検証

- タンク形状: 円筒タンク 内径4m × 高さ4m (円錐板頂点: 4.3m)
- 初期液面高さ: 3m
- 天板: 平板
- 液相: 軽油 (52°C) 気相: 空気 (20°C)
- 入力波: 1968年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録(*)を2倍にした波 X,Y,Z方向同時入力 (解析では20[s]を0[s]とした)

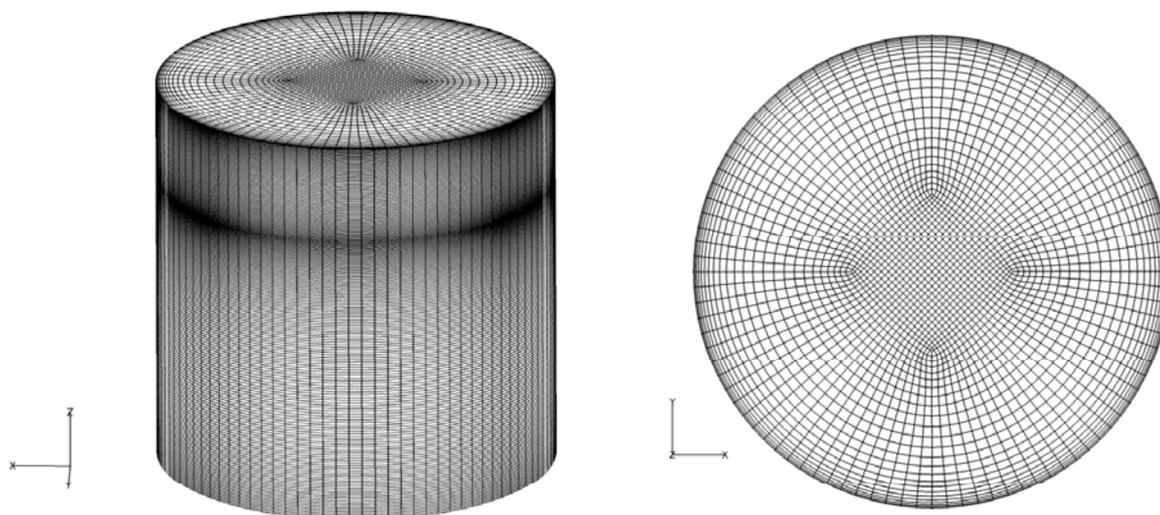


*翠川三郎, 三浦弘之: 1968年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録の再数値化, 日本地震工学会論文集, 第10巻, 第2号, pp.12-21, 2010
http://www.enveng.titech.ac.jp/midorikawa/open_data.html

解析事例 自由表面解析

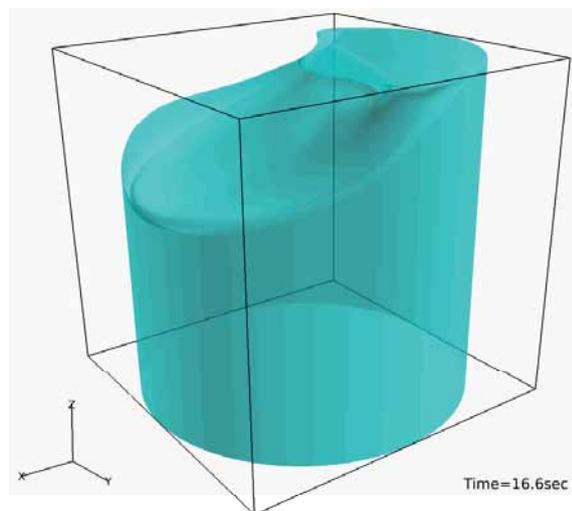
■ 計算格子

周方向: 96分割
高さ方向: 200分割
節点数: 588,729

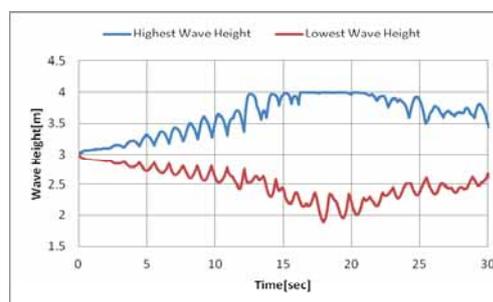


解析事例 自由表面解析

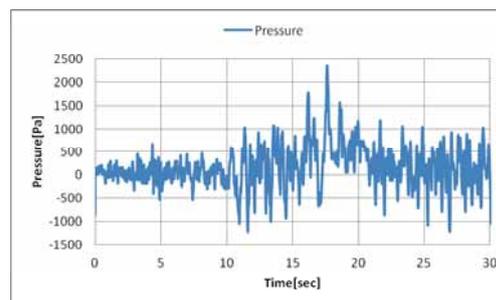
■ 解析結果



解析結果:地震による表面挙動や波高・圧力の時間変化を計算することが可能。



最大波高と最小波高の時間変化



天板における最大圧力の時間変化

解析事例 気泡合体解析

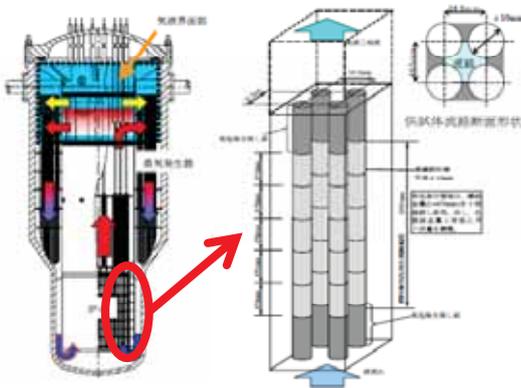
(目的) 新型炉(自然循環炉)燃料集合体試験のサブチャンネル解析

■ 解析条件

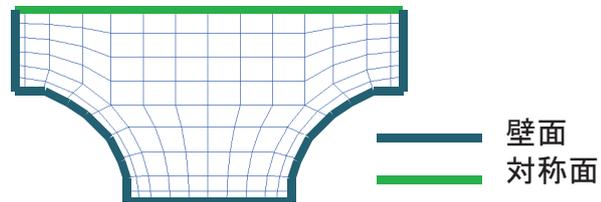
- ・通常運転を想定した代替流体の気液二相流 (気相: 六フッ化硫黄、液相: エタノール)
- ・高レイノルズ数型のk-εモデルを適用
- ・壁面には壁関数を適用
- ・最下段のみから気泡を注入した試験
- ・気泡は、0.1mmから5mmまでを5群で考慮

■ 計算格子

- ・断面内のメッシュサイズは1mm程度
- ・軸方向のメッシュサイズは3mm程度
- ・解析格子数 81,150 (1/2モデル)



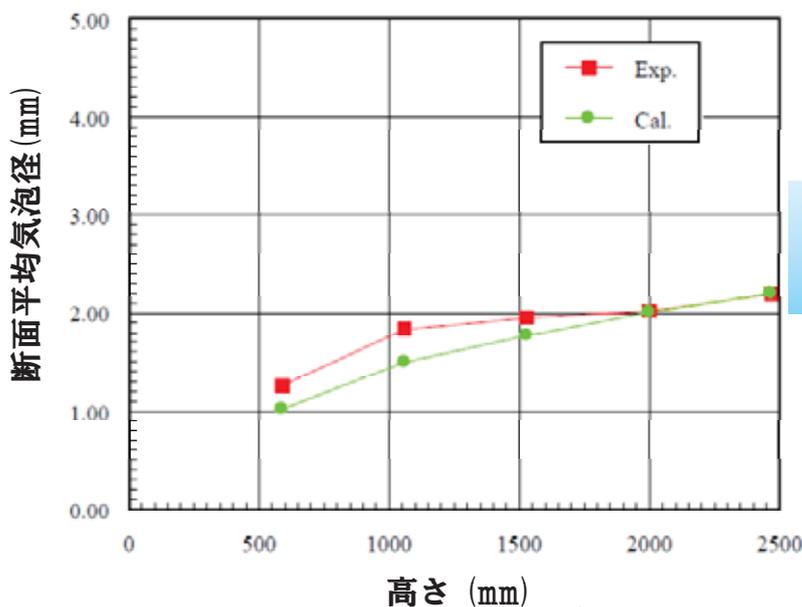
出典:
 革新的実用原子力技術開発費補助事業
 平成18年度成果報告書概要版
 「高温高圧二相自然循環炉の熱流動システム評価手法の開発」



解析事例 気泡合体解析

■ 解析結果

断面平均気泡径の高さ方向分布: 実験値と計算値の比較

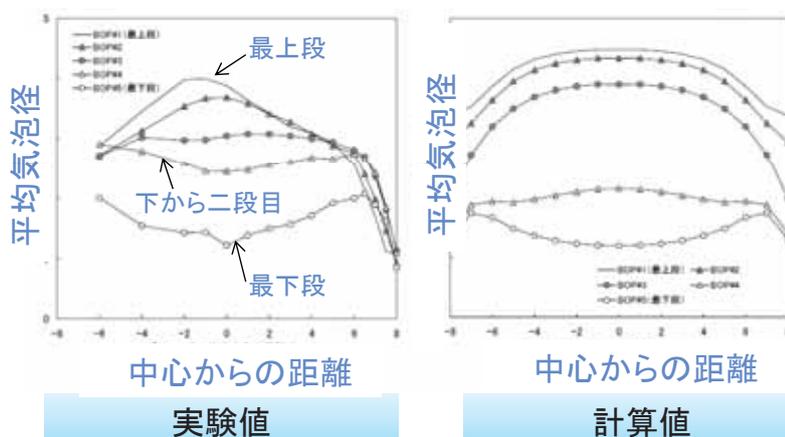


解析結果: サブチャンネル内の上昇に伴って気泡径が増大する実験値を再現。

出典:
 革新的実用原子力技術開発費補助事業
 平成18年度成果報告書概要版
 「高温高圧二相自然循環炉の熱流動システム評価手法の開発」

解析事例 気泡合体解析

■解析結果



解析結果: 以下の実験値を再現

- ① 下段では、気泡径が2mm以下の比較的小サイズであるため壁近傍に集まる「鞍型分布」を形成
- ② 下流側に発達するにつれて、合体によって気泡が大型化してサブチャンネル中心に集まる「砲弾型分布」を形成

出典: 革新的実用原子力技術開発費補助事業
平成18年度成果報告書概要版
「高温高圧二相自然循環炉の熱流動システム評価手法の開発」

Advance/FrontFlow/MPのロードマップ

■2015年夏 バージョンアップ(予定)

- 前処理の壁面までの距離計算方法の改良
- 前処理の省メモリ化
- 京スパコンでの稼働(超並列化への対応)
- セル中心法の導入
- ラージ・エディ・シミュレーションの組み込み
- GNU Fortran / C コンパイラへの対応

■2016年夏 バージョンアップ(予定)

- AMGソルバーの導入
- リスタート計算時の並列数の変更
- 数値パラメーターの最適化
- 沸騰時の離脱気泡径の相関式
- 沸騰時の気泡離脱速度の相関式
- 多群詳細気泡流モデルへの沸騰・凝縮モデルの組み込み

■2017年夏 バージョンアップ(予定)

- テトラメッシュ対応(メッシュ作成を簡単化)
- 圧縮性二相流への拡張
- 多成分への拡張(水分中の油や水蒸気中の空気など)

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red による3次元流体解析

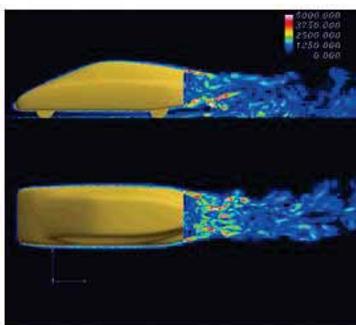
第2事業部 大西 陽一

原子力安全解析セミナー
2014年11月27日（木）
アドバンスソフト株式会社

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red とは？

速度、圧力、温度、燃焼、物質拡散、騒音、キャビテーション、微粒子などの
変動や平均分布を予測・解析するソフトウェア

空力

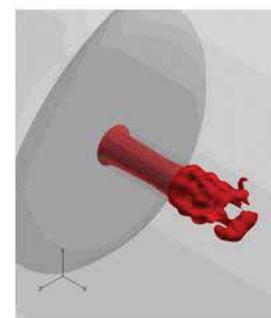


ラージエディシミュレーション
LES

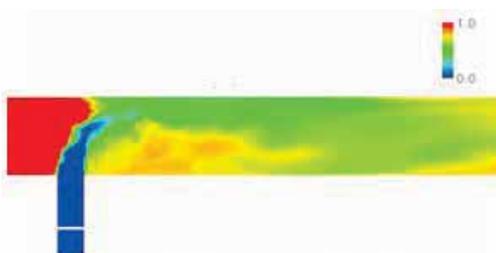
並列計算

コスト
パフォーマンス

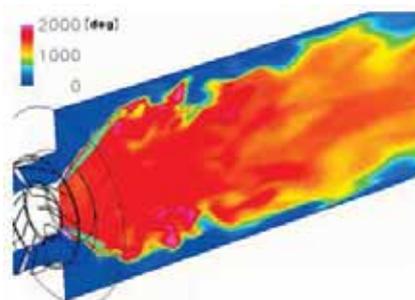
キャビテーション



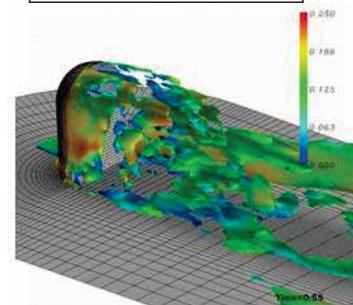
温度



燃焼



騒音



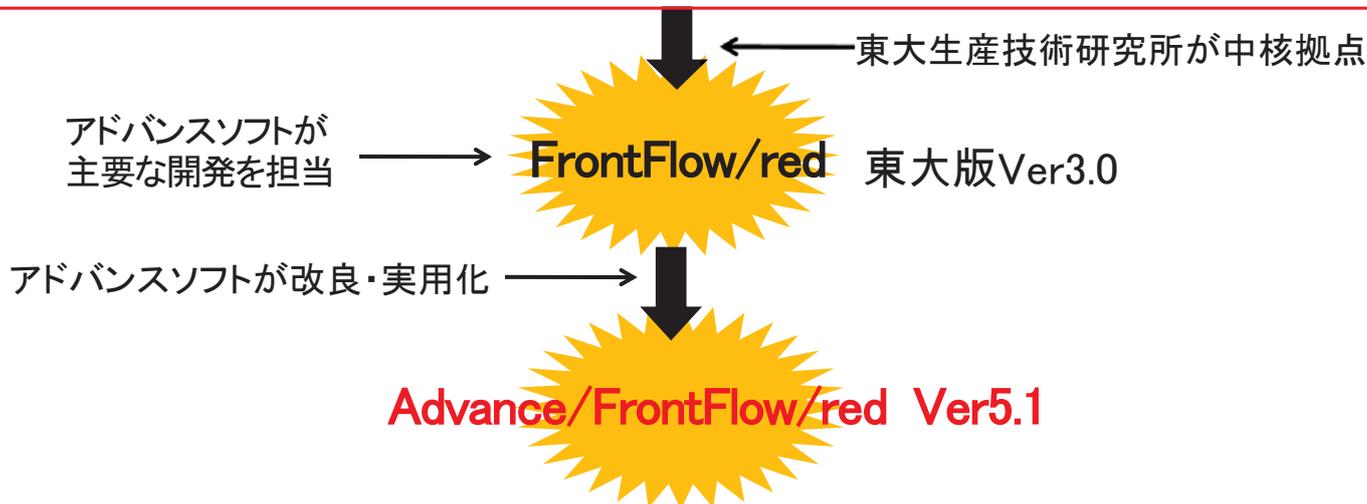
Advance/FrontFlow/redの特長

- ① 文部科学省のプロジェクトで開発したFrontFlow/redをアドバンスソフトが改良・実用化した国産のソフトウェア
- ② ラージ・エディ・シミュレーション (LES) による流体解析
- ③ 開発技術者によるお客様のサポート
- ④ 柔軟なカスタマイズ対応 → お客様が必要とする機能の追加

Advance/FrontFlow/redの開発経緯

世界トップ水準のシミュレーションソフトウェアを作る国家プロジェクト

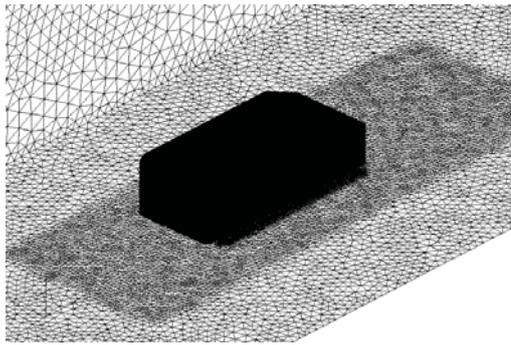
文部科学省「戦略的基盤ソフトウェアの開発」プロジェクト (2002～2004年度)
 文部科学省「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクト(2005～2007年度)



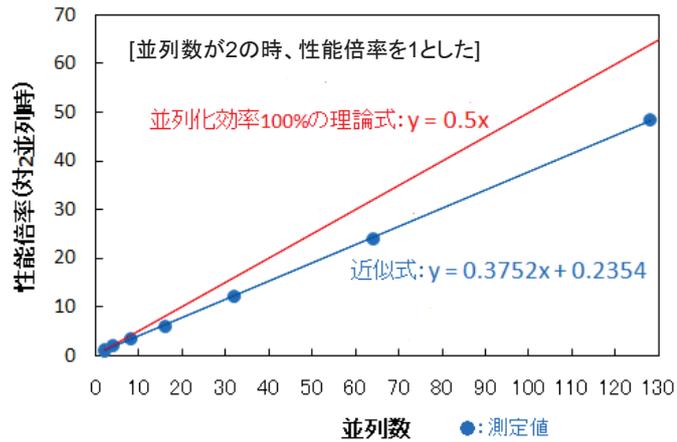
Advance/FrontFlow/redは東京大学生産技術研究所計算科学技術連携研究センターが実施した文部科学省ITプログラム「戦略的基盤ソフトウェアの開発」プロジェクトの成果(ソフトウェア)をアドバンスソフト(株)が独自に改良したものです。アドバンスソフト(株)は「戦略的基盤ソフトウェアの開発」および「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトに参加し、ソフトウェアの開発を行いました。



Advance/FrontFlow/redの並列性能



評価モデルの計算格子



2並列に対する性能倍率

計算機: 富士通製BX922S6 1ノードあたり12コア
 (財団法人計算科学振興財団FOCUSのスーパーコンピューターを使用)
 評価モデル: 車体周り流れ解析の標準モデル(Ahmed車体モデル)
 計算格子: テトラ、プリズムの混合要素
 節点数: 1,505,423
 要素数: 7,638,219
 使用した並列数: 2、4、8、16、32、64、128



原子力分野 事例紹介

Advance/FrontFlow/redを利用した压力容器 構造解析用詳細熱流動解析

本事例は、以下の論文の成果をもとに構成されています。

J. Katsuyama, G. Katsumata, K. Onizawa, T. Watanabe .and Y. Nishiyama.
 “STUDY ON STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT OF REACTOR PRESSURE VESSEL BASED ON
 THREE-DIMENSIONAL THERMAL-HYDRAULICS AND STRUCTURAL ANALYSES”
 Proceedings of the ASME 2014 pressure Vessels & Piping Conference PVP2014

※印刷不可

当日会場でのみご紹介いたします。

Advance/FrontFlow/redによる原子力関連解析実績

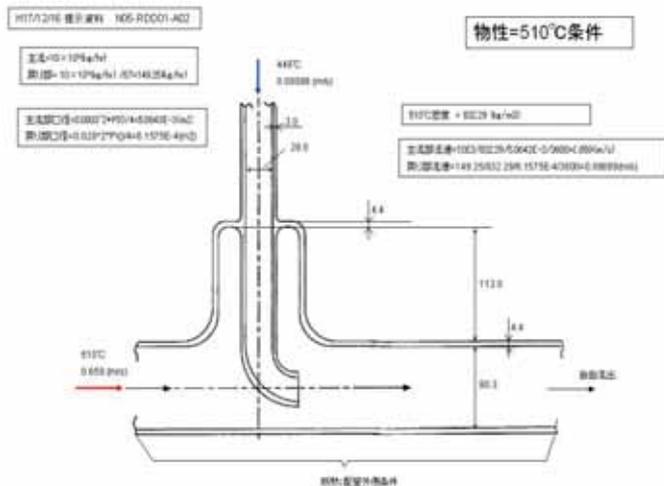
- 核融合炉用テストブランケットモジュール内部の冷却材流動解析
- **1次ナトリウム純化系配管混合部の熱解析**
- T字配管合流部の熱解析
- OECD/NEA T字管ベンチマーク解析
- 沸騰水型原子炉压力容器内熱流動詳細解析
- 高速増殖原型炉PHÈNIX二次冷却系配管混合部の熱流動解析
- 高速増殖原型炉もんじゅ燃料集合体サブチャンネル解析
- 高速増殖実証炉燃料集合体サブチャンネル解析
- 下部ヘッド溶融炉心デブリベッドの溶融凝固を伴う乱流解析

1次ナトリウム純化系配管混合部の熱解析

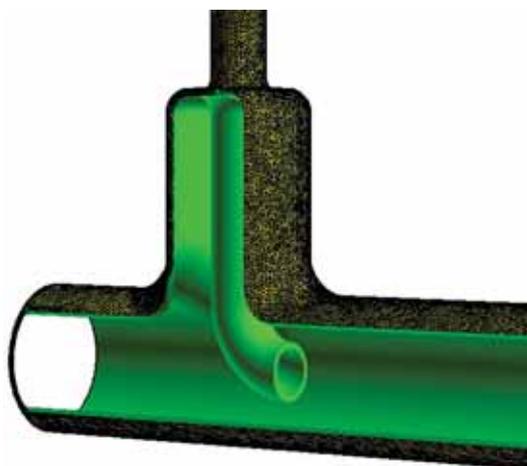
[目的]

高速増殖炉のレベル1 PSA におけるナトリウム漏えい発生頻度を評価する。
流体混合部の流体及び構造材の温度挙動の把握と、バウンダリ破損確率を評価する。

[解析条件]



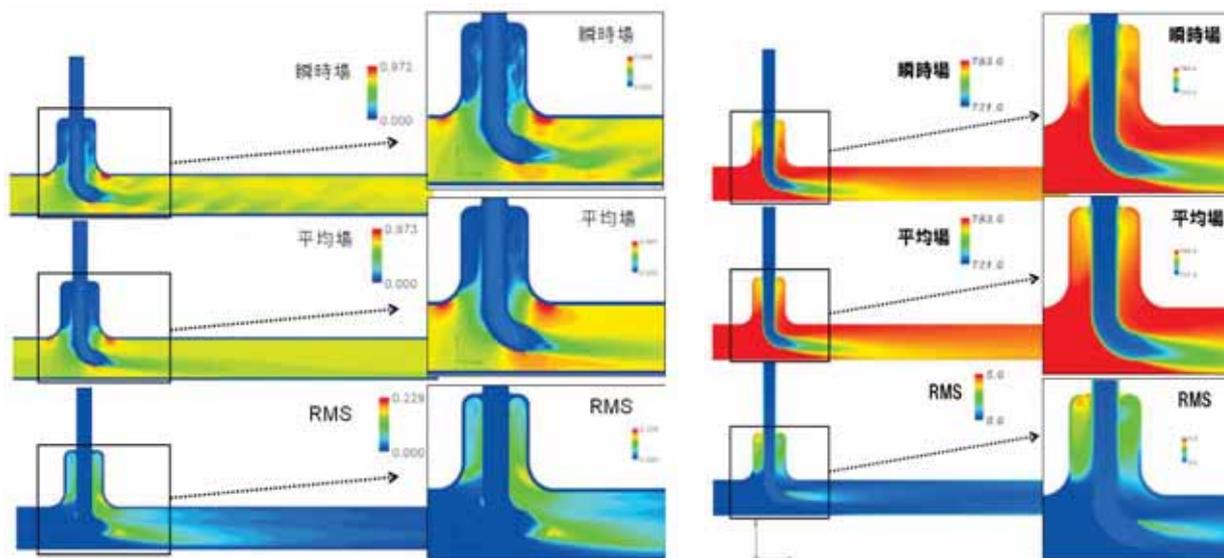
[解析対象]



委託解析: JNES独立行政法人原子力安全基盤機構様
Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

1次ナトリウム純化系配管混合部の熱解析

[解析結果]



速度分布

温度分布

委託解析: JNES独立行政法人原子力安全基盤機構様
Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

高速流解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/FOCUSによる 爆発現象の影響評価予測のための 流体-構造連成シミュレーション

第2事業部 中森 一郎

原子力安全解析セミナー
2014年11月27日（木）
アドバンスソフト株式会社

発表内容

- 爆発現象に対する解析の背景・現状
- 配管内での爆発現象に対する流体-構造連成の解析事例

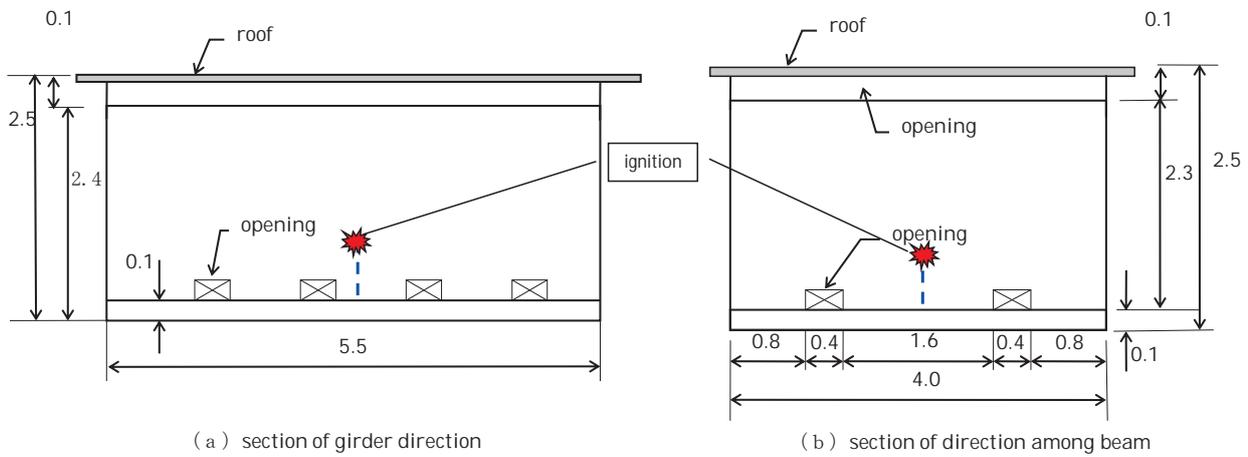
爆発現象に対する解析の背景・現状

爆発シミュレーションの必要性

- **爆発危険性評価の必要性**
 - ①施設の設計前に爆発危険性予測により設計指針の立案
 - 
 - ②設計指針を基に施設の設計の実施
 - 
 - ③設計結果に対して再度爆発危険予測の実施し、安全性の確認
 - 
 - ④安全上の問題点が見つかった場合、再設計または防爆対策の検討
- **安全管理上、爆発危険性評価が必須 ⇒ 予測手法の確立**

既往のシミュレーション(爆燃)

LPG容器置き場爆発実験



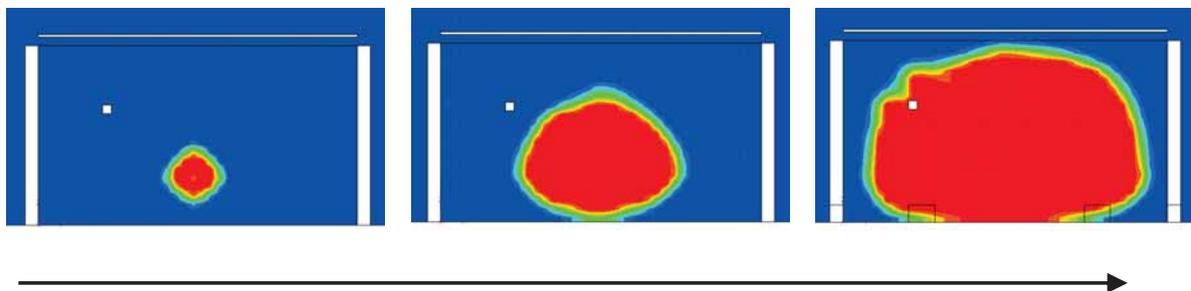
LPG容器置き場内爆発実験

壁面:コンクリートブロック、屋根:スレートのLPG容器置き場内にLPGを注入
室内中央、高さ50cmの点で着火・燃焼

※高橋, 富塚, 永野, 高桑, 武井, 越, 土橋, 山鹿, 難波, 「実規模LPガス漏洩・爆発評価システムの開発」, Science and Technology of Energetic Materials, Vol.65, No.4, p.116-124 (2004)

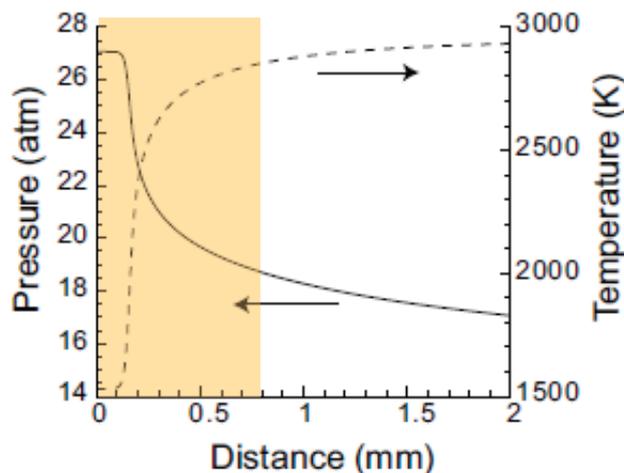
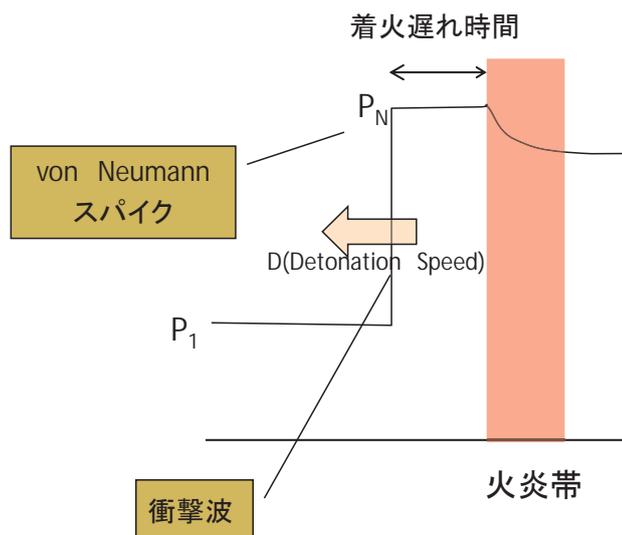
既往のシミュレーション(爆燃)

火炎伝播計算例



※高橋, 富塚, 永野, 高桑, 武井, 越, 土橋, 山鹿, 難波, 「実規模LPガス漏洩・爆発評価システムの開発」, Science and Technology of Energetic Materials, Vol.65, No.4, p.116-124 (2004)

火炎構造(爆轟の場合)



ZNDモデルによる水素-空気 detonation の一次元構造計算例

火炎構造の解析には
ミクロンオーダーの解像度が必要

爆発シミュレーションの課題

- 実験
 - 人体や周辺施設の危険性
 - 膨大なコスト
- 既往の数値シミュレーション
 - 現状の数値モデルで燃焼問題に対応するには膨大な計算格子数と計算機資源が必要
 - 解析スケール: 現象のスケールが 10^0m 以上に対し、計算格子幅は 10^{-6}m オーダーが必要
- 実用的なスケール($10^0\sim\text{m}$)の爆発評価のための火炎伝播モデルが必須

配管内での爆発現象に対する 流体-構造連成の解析事例

配管の破断事故

浜岡原発における配管の破断事故(2001年)

肉厚11mmの炭素鋼



配管にたまっていた
水素に着火
↓
爆轟波による
破断と推定

水素爆発による配管破断 JAERI-Tech 2001-094 (2001年12月)、P.15

**爆轟波による配管破断
過程の解析が必要**

配管の破断試験

爆轟波による配管の破断試験 (一般社団法人 日本原子力技術協会)

試験体配管概略図

爆轟波が進行

○: 圧力測定位置
□: ひずみ測定位置
+偶数は周方向
奇数は軸方向
のひずみを計測。

エルボ部の圧力上昇
(入射波&反射波)
↓
破断

着火端側

閉止端

破断部詳細写真

BWR(沸騰水型原子炉)配管における混合ガス(水素・酸素)の燃焼による配管損傷防止に関するガイドライン(第3版)

配管の破断試験に対する連成解析

試験体配管概略図

爆轟波が進行

○: 圧力測定位置
□: ひずみ測定位置
+偶数は周方向
奇数は軸方向
のひずみを計測。

エルボ部の圧力上昇
(入射波&反射波)

FOCUS-DYNA3D2000による
連成解析を実施

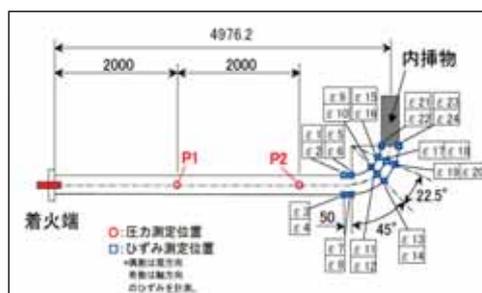
- 弾塑性材料(破壊オプションなし)を用いた連成解析
 - 配管内の爆轟波(圧力分布) ← 破断試験の結果と比較
 - 配管の変形
- 破壊オプションを適用し、配管に生じた穴から流体が噴出する様子を再現

解析モデル

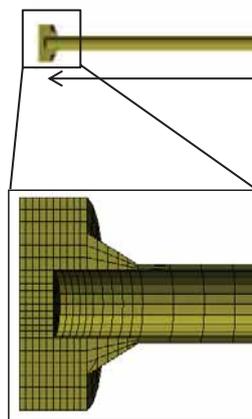
構造解析 (DYNA3D2000)

節点数: 15978

要素数: 11680



内挿物
1000mm



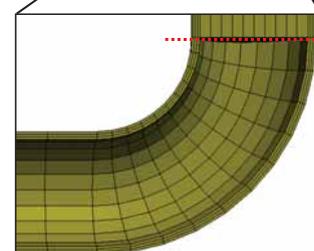
4976mm



配管断面

配管厚み4mm

配管内径52mm



解析モデル

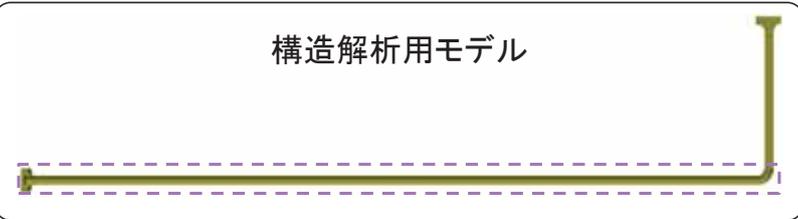
流体解析 (FOCUS)

直交格子法 & 埋め込み境界法

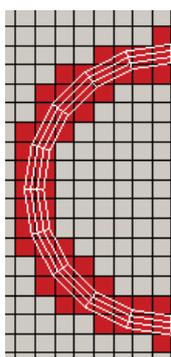
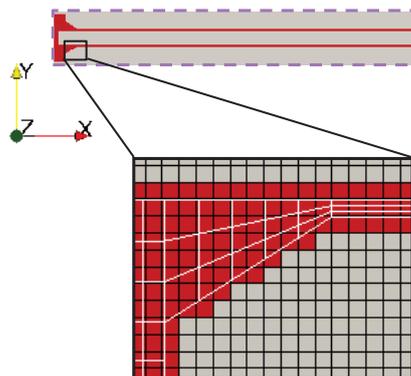
格子幅: 4mm

■ 格子: 構造物と認識された格子

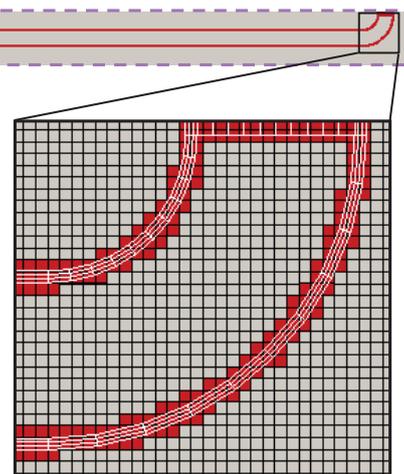
白線: 構造解析用モデル



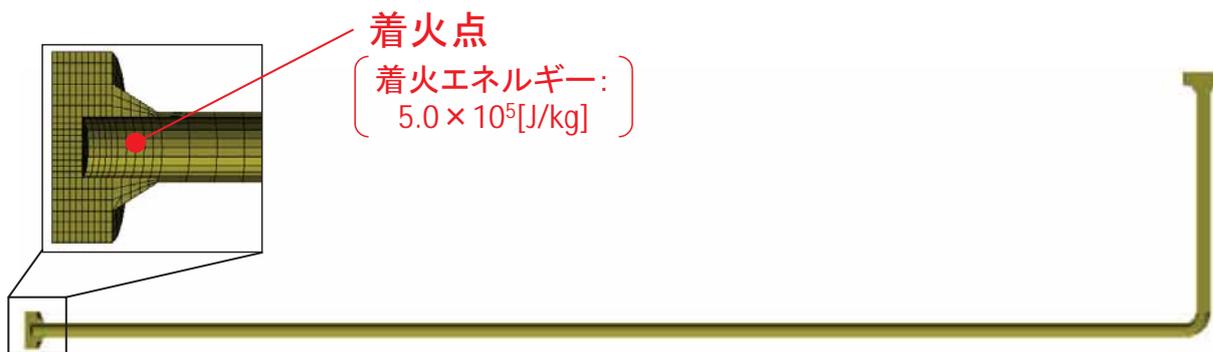
格子数: 1276(x方向) × 50(y方向) × 15(z方向) = 957,000



配管断面



解析条件



[流体解析]

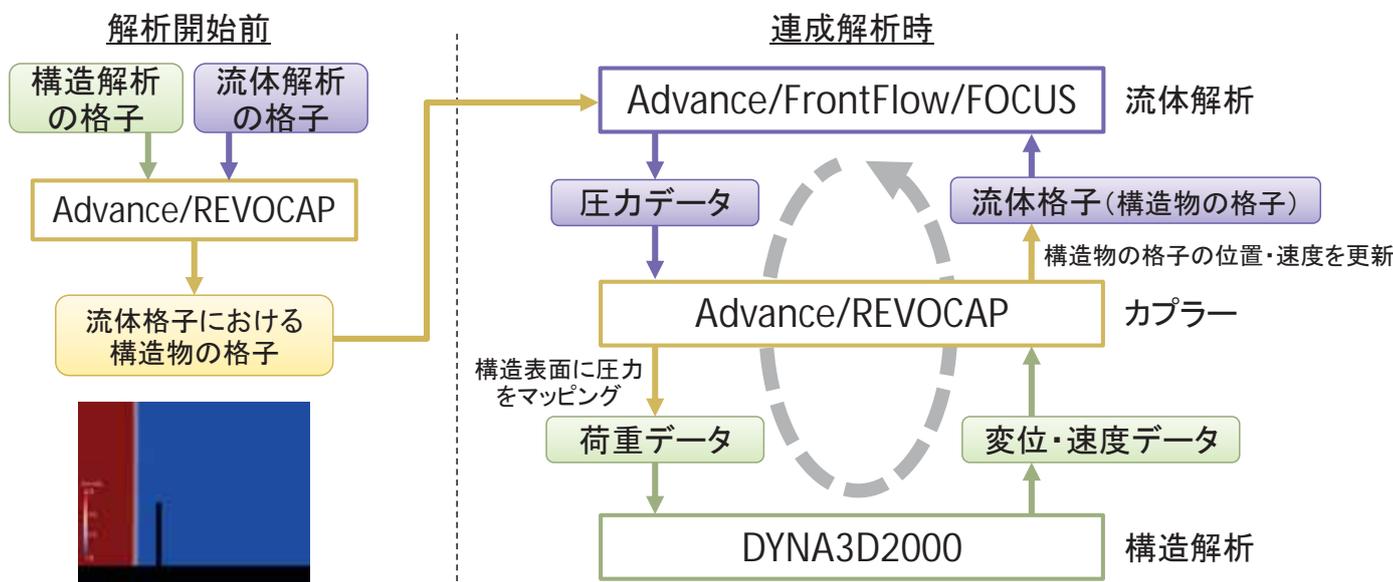
初期圧力: 3.5[MPa]
 初期温度: 15[°C]
 時間刻み: 1.0×10^{-7} [s]
 時間積分法: ルンゲクッタ陽解法

[構造解析]

配管の物性: 弾塑性材料
 ヤング率: 206[GPa]、ポアソン比: 0.29 (弾性域)
 降伏応力: 300[MPa]
 時間刻み: 1.0×10^{-7} [s]
 時間積分法: 陽解法

流体-構造連成解析の流れ

- 解析開始前に構造格子、流体格子の位置情報をREVOCAPが読み込み、流体格子における構造物の格子を抽出する。
- 流体解析を行い、構造表面の圧力をREVOCAPが荷重に変換し、DYNA3D2000に与えて構造解析を行う。
- 変形した構造物の情報から、流体格子における構造物の格子の位置・速度を更新する。

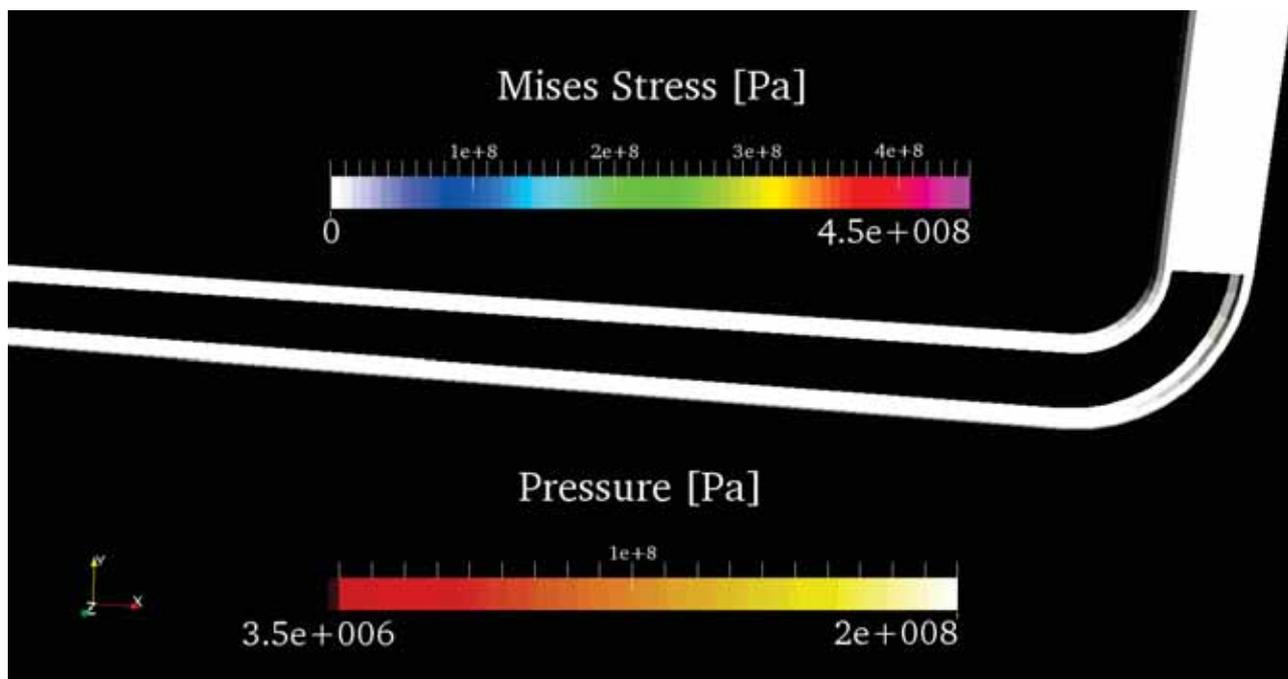


解析結果

弾塑性材料(破壊オプションなし)を用いた連成解析

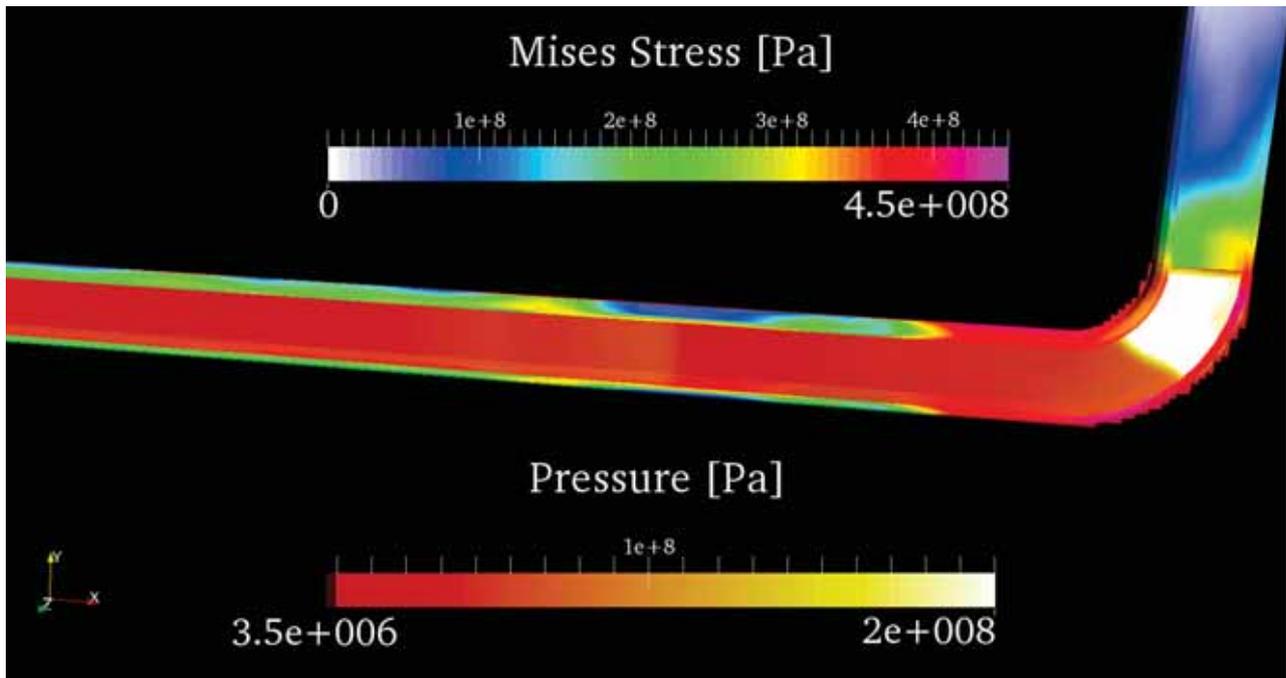
解析結果

アニメーション: 配管内圧力、配管ミーゼス応力



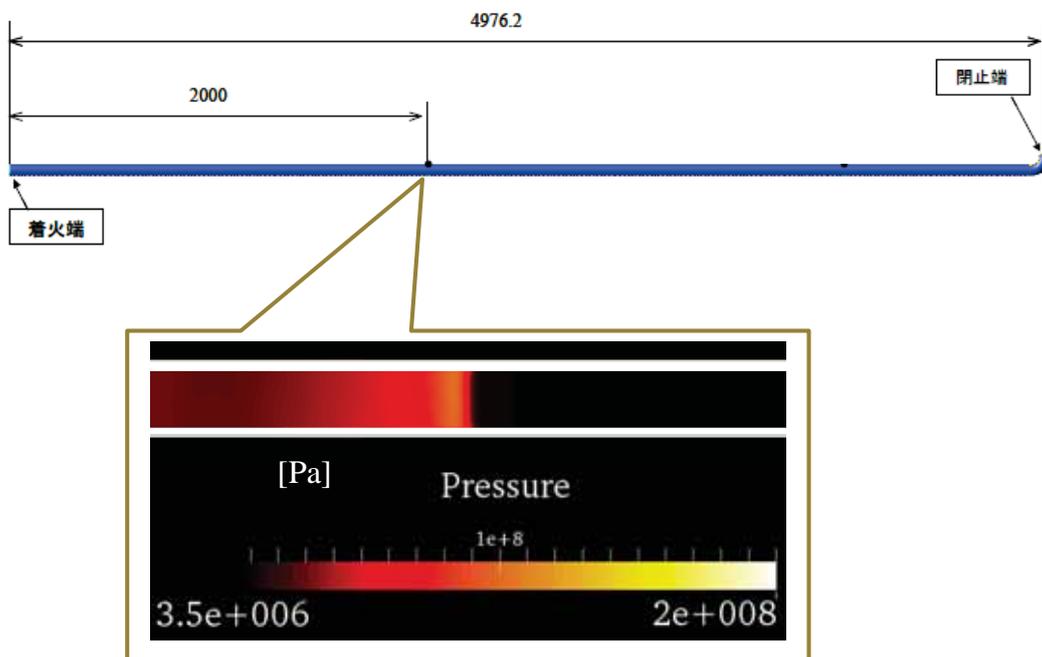
解析結果

爆轟波がエルボ部に達した時の配管内圧力、配管ミーゼス応力



解析結果

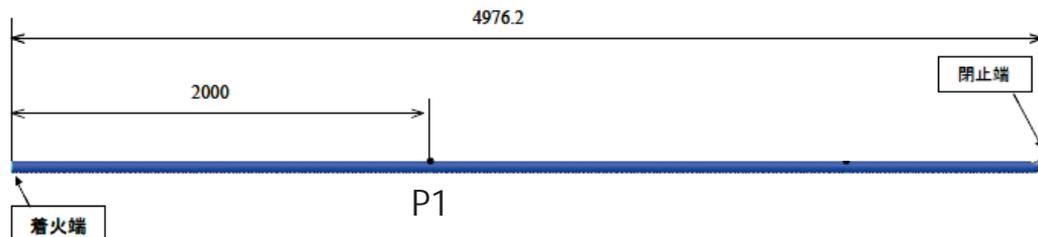
点P1を爆轟波が通過時の圧力分布



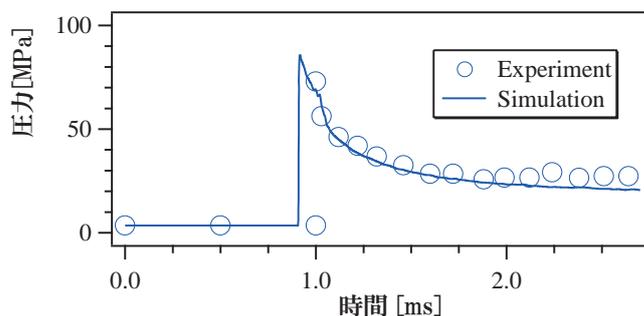
爆轟波の前後の圧力比は20~30

解析結果

着火端と観測点P1の模式図

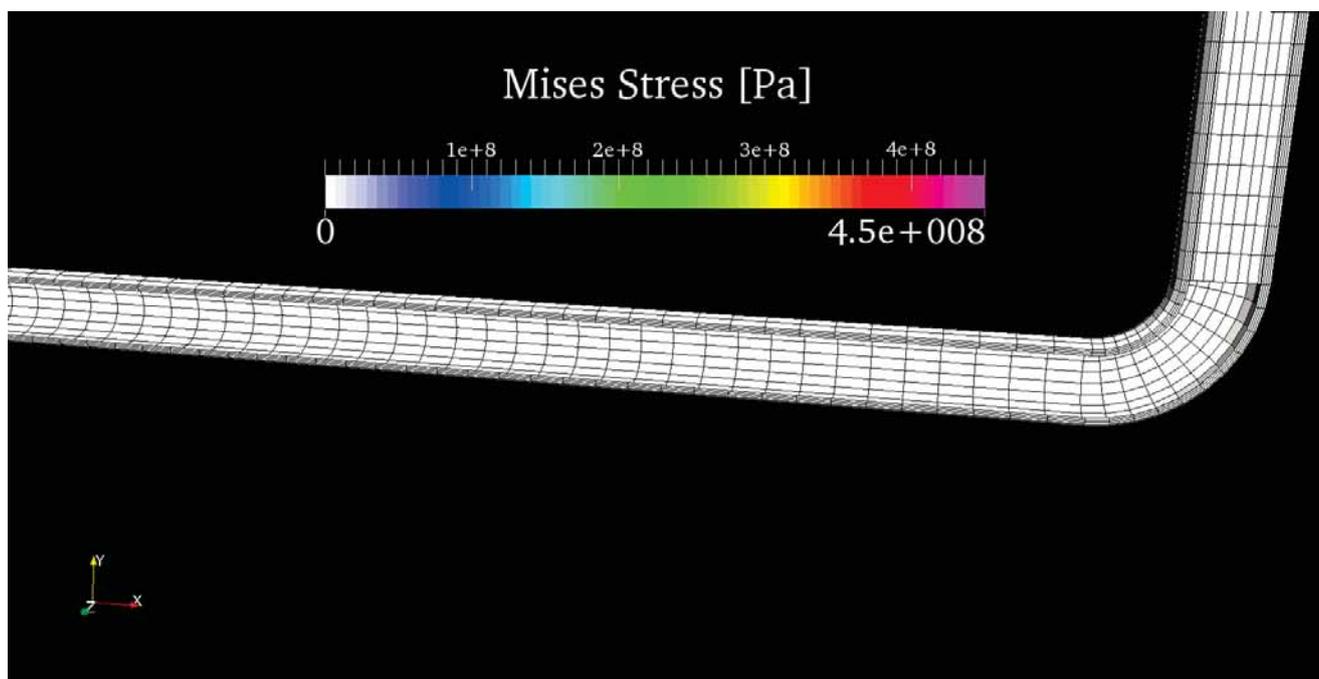


圧力に関する実験値との比較



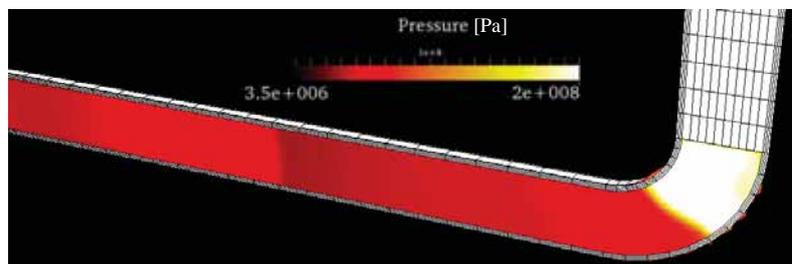
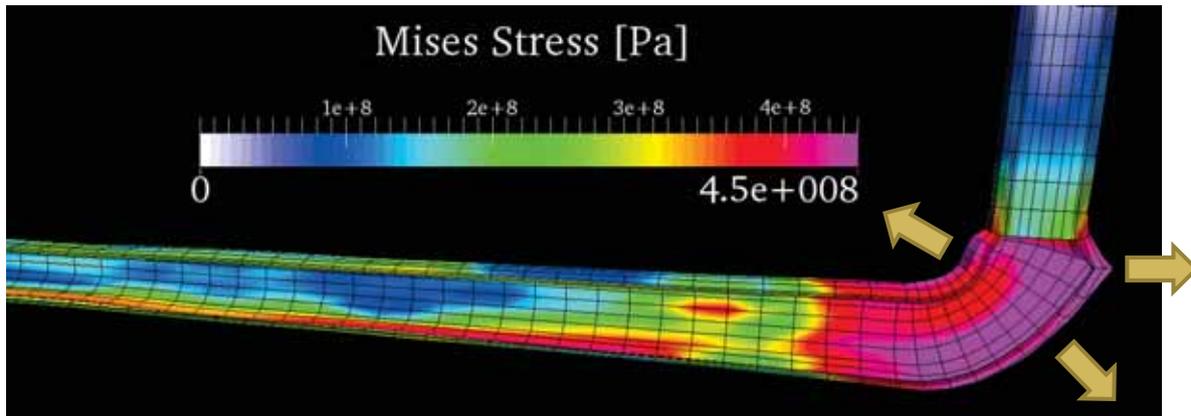
解析結果

アニメーション: 配管ミーゼス応力、配管変形(変形倍率5倍)



解析結果

爆轟波がエルボ部に達した時の配管ミーゼス応力、配管変形(変形倍率5倍)



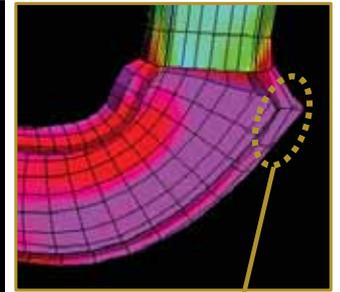
爆轟波による配管の膨張

解析結果

破壊オプションを適用し、配管に生じた穴から流体が噴出する様子を再現

解析結果

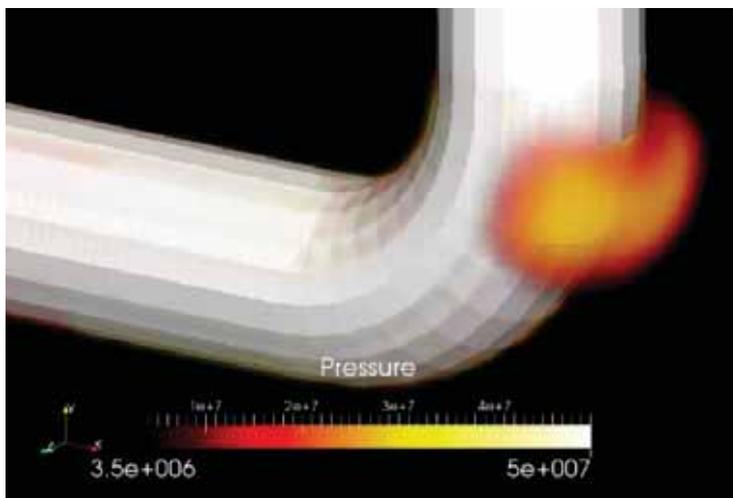
アニメーション: DYNA3D2000の破壊オプションを用いて配管を破壊し、破壊して生じた穴から流体が噴出する様子を再現



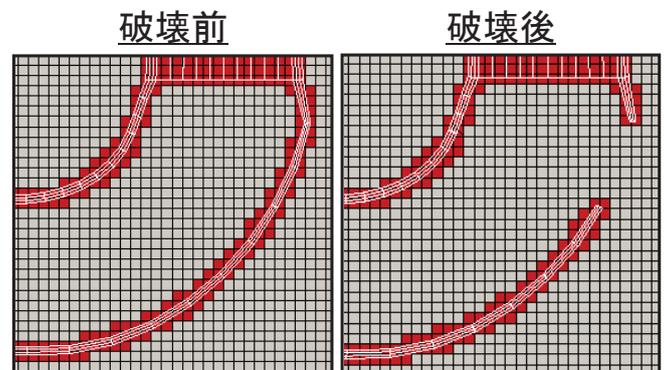
破壊箇所

解析結果

配管内の流体が噴出する様子
(配管に穴が生じた直後)



エルボ付近の構造解析モデル(白線)と流体格子



■ 格子: 構造物と認識された格子

破壊オプション(DYNA3D2000)と埋め込み境界法(FOCUS)の組み合わせにより、穴開き後も流体計算が可能

まとめ

- 爆発現象に対する解析の背景・現状
- 配管内での爆発現象に対する流体-構造連成の解析事例
 - 火炎モデルと爆轟モデルのご紹介
 - FOCUS-DYNA3D2000による連成解析機能を用いて、配管内部で生じる爆轟波の圧力分布、配管の変形を解析
 - DYNA3D2000の破壊オプションを用いて、配管からの流体噴出の様子を再現



警告

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立つ用途に限定して無料配布しています。このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。